

레이저 굴절교정 수술을 위한 웨이브프론트 맵의 선택에서 구면수차의 고려

안성민¹ · 석수지¹ · 박철용^{2,3}

동국대학교 의과대학 안과학교실¹, 동국대학교 일반대학원 의학과², 동국대학교 일산병원 안과³

목적: 암순응 상태에서 광학수차의 동적인 양상을 보고하고자 한다.

대상과 방법: 레이저 시력 교정술을 시행 예정인 20안을 대상으로 WavescanTM (AMO/VISX)을 이용하여 반복적으로 웨이브프론트 데이터를 측정하였다. 웨이브프론트 검사 결과 중 구면값, 난시, 평균동공크기, 구면수차, 코마수차와 세조각 수차를 선택하여 연관성을 분석하였다.

결과: 암순응 상태에서 구면값, 구면수차, 코마수차 및 동공크기는 다양하게 변화하였다. 구면값이 1D씩 근시로 이동할 때마다 구면수차와 동공크기는 $0.10 \pm 0.04 \mu\text{m}$ 와 $0.55 \pm 0.37 \text{ mm}$ 로 각각 감소하였다. 9명의 13안(65%)에서 구면값과 구면수차, 4명의 5안(25%)에서 구면값과 동공크기, 3명의 3안(15%)에서 구면값과 코마수차간에 유의한 양의 상관관계가 있었다. 4명의 4안(20%)에서는 동공크기가 감소함에 따라 구면수차도 유의하게 감소하였다.

결론: 인간 눈의 광학수차는 암순응 상태에서 동적인 양상을 보인다. 특히 구면값과 구면수차간에는 뚜렷한 상관관계가 존재한다. 이들은 레이저 시력 교정수술 시에 최적의 웨이브프론트 데이터를 선택하는 데 활용될 수 있을 것이다.

<대한안과학회지 2011;52(2):147-156>

웨이브프론트(wavefront) 기술은 안과 영역에 고위수차(high order aberration) 개념을 도입시켰고 복잡한 인간의 시각에 대해 더 잘 이해할 수 있도록 하였다.¹⁻⁶ Zernike공식을 통해 복잡한 형태의 웨이브프론트를 저위수차와 고위수차의 여러 수학적 요소로 나눌 수 있게 되었고 실제로 인간의 시각에 미치는 각각의 영향을 분석할 수 있게 되었다.⁷

고위수차는 망막에서 이미지의 질을 저하시키는데,⁸ 때로는 저위수차(low order aberration)보다 더 많이 망막 이미지를 왜곡시킨다.⁹ 또한 이전의 연구들에 의하면 고위수차는 저위수차와 밀접한 연관성이 관찰된 바 예를 들어 탈초점(defocus)과 구면수차(spherical aberration), 그리고 난시(astigmatism)와 이차난시(secondary astigmatism)간의 상호 작용이 바로 그러하다.^{9,10}

최근의 레이저 굴절 수술 대상자에 관한 연구에서는 상당한 양의 고위수차가 수술 전에도 존재하며, 주로 코마(coma), 세조각(trefoil), 구면수차인 것으로 보고되었다.¹¹ 구면수차와 코마수차는 레이저 굴절 수술 후에 증가하는

주된 고위수차로 알려져 있으며, 이러한 고위수차의 증가는 레이저 절삭에 의한 각막 앞면의 비구면성의 변화에 의한 것으로, 특히 레이저 절삭면과 레이저 굴절 수술 후 상처치유 반응 등에 의해 유발된다.^{12,13}

레이저 굴절 수술 후에 발생할 수 있는 고위수차를 감소시키려는 노력이 최근 굴절 분야 연구에서 중요한 쟁점 중 하나이다. 각 레이저기기 제조사별로 다양한 해결책을 제시한 새로운 엑시머 레이저 시스템을 출시하면서 웨이브프론트 방식을 이용한 레이저 절삭(Wavefront guided laser ablation)이나, 웨이브프론트 최적화 레이저 절삭(Wavefront optimized laser ablation) 및 각막지형도 유도 레이저 절삭(Topography guided laser ablation) 등이 소개되었다.^{4,14-17}

웨이브프론트 방식을 이용한 레이저 굴절수술에서 환자 눈의 웨이브프론트 데이터는 웨이브프론트 센서에 의해 측정된다. 이렇게 얻어진 술 전의 고위수차는 개별적으로 맞춤형 수술에 적용된다. 큰 고위수차를 가지고 있거나 굴절오차가 큰 경우가 통상적으로 웨이브프론트 방식을 이용한 레이저 절삭수술의 적절한 대상이지만, 고위수차 및 굴절 오차가 낮은 눈에서도 이 기술은 적용될 수 있고 또한 효과를 볼 수 있다.

그러나 사람 눈이 가지는 고위수차는 항상 일정하지 않고 다양한 유동성을 보인다. 특히, 나이, 동공의 직경, 조절 상태 등의 여러 요인에 의해 영향을 받아 항상 변화한다.¹⁸

■ 접수 일: 2010년 6월 4일 ■ 심사통과일: 2010년 8월 24일
■ 게재허가일: 2010년 12월 13일

■ 책임저자: 박 철 용

경기도 고양시 일산동구 식사동 814
동국대학교 일산병원 안과
Tel: 031-961-7395, Fax: 031-961-7977
E-mail: cpark@duih.org

나이가 들어감에 따라 고위수차는 증가하는 경향이 있으며, 작은 동공의 경우 큰 동공에서보다 고위수차의 변화가 적은 것으로 알려져 있다.¹⁹ 또한, 조절 과정으로도 수정체가 변화하고 동시에 고위수차의 변화가 유발될 수 있다. 이전에 보고된 바로는 수정체의 조절 노력과 더불어 코마와 세조각 수차는 다양한 방향으로 변화하는 양상을 보이고, 구면수차는 일정한 양상으로 감소하게 됨이 알려져 있다.²⁰

따라서, 재현 가능하며 신뢰할 수 있는 웨이브프론트 데이터 얻기 위해서 동공의 직경과 조절의 영향을 최소화하는 것이 필수적이다. 그러나, 임상적으로 웨이브프론트 센서의 사용 지침은 통상적으로 주관적인 굴절상태를 더 잘 반영하기 위해 조절마비제나 산동제를 사용하지 않은 상태로 웨이브프론트를 측정하기를 추천한다. 그러므로 환자의 조절 상태에 따라 일관되지 않는 웨이브프론트 데이터를 얻는 일이 흔히 발생한다. 불안정한 웨이브프론트 데이터는 광학수차를 최소화하여 최적의 수술 계획을 선택하는 데 어려움을 준다.

본 연구에서 저자들은 Hartmann-Shack 방식의 수차계를 이용한 웨이브프론트 데이터 수집 과정 중에 고위수차의 다양한 요소들과 동공 크기의 변화를 관찰하였다. 우리는 이러한 변수들과 조절과정에서의 연관성을 살펴보고 레이저 굴절 수술에서의 고위수차와 동공 크기의 변화에 따른 결과에 대해 고찰하였다.

대상과 방법

환자군

동국대학교 일산병원에서 레이저 굴절수술이 예정된 환자들 중, 원거리에서의 교정시력이 20/20 이상이며 수정체의 혼탁 등 다른 안과적 질환이 확인되지 않은 정상안을 대상으로 10명 20안을 모집하였다. 대상자들에게 모두 세극등 현미경검사, 각막지형도 검사(PentacamTM, Oculus, Germany)와 안저 검사가 시행되었다. 연구 설계는 동국 대학 병원의 연구 검토단에 의해서 승인받았고 헬싱키 선언을 준수하였다.

웨이브프론트 분석

웨이브프론트 분석은 Hartmann-Shack 수차계(WavescanTM, VISX/Advanced Medical Optics, Santa Clara, CA)를 이용해서 경험이 많은 검사자에 의해 시행되었다. 우안부터 측정하였고, 한 번 스캔이 완료되면 반대편 눈을 시행하는 방법으로 모든 검사가 완료될 때까지 반복하여, 각 눈에서 8

내지 10번의 웨이브프론트 정보를 획득하였다. 검사하는 동안, 환자는 빛이 완전히 차폐되어 어두운 방안에 앉아서 수차계 내부의 붉은 주시점을 보도록 하였다. 처음에 4 내지 5번의 스캔은 환자에게 주시점을 “매우 편안한” 상태로 보도록 하였고, 다음 4 내지 5번은 “노력해서 또렷히” 보도록 하였다. 환자가 불편을 느끼게 되면 스캔을 중단하고 다시 불편없이 할 수 있을 때까지 기다렸다. 환자의 안구 표면 건조를 예방하기 위하여 검사 중 무방부제 0.1% hyaluronate sodium 점안액(히아레인미니, Taejoon Pharm, Seoul, Korea)을 수시로 점안하였다.

레이저 시력 교정

모든 대상안은 웨이브프론트 방식을 이용한 레이저 각막 절제술을 시행하였다. 수술에 사용할 웨이브프론트 데이터는 다음과 같은 원칙에 의해 선택되었다. 먼저, 현성 굴절검사로 얻은 구면값과 0.5디옵터 이내의 구면값을 가지는 웨이브프론트 데이터를 선택하였다. 그런 다음, 가장 양의 구면수차를 가지는 맵을 선택하여 최종 맵으로 수술에 사용하였다. 동공 크기는 이 과정에 고려되지 않았다.

수술 과정은 20% 알콜을 30초간 각막에 점적하였다가 10 ml의 평형염액으로 세척한 다음, 상피덮개를 절단해 들어 올리고 홍채인식과정(Visx STAR S4 IR, Abbott Medical Optics Inc., Santa Ana, CA, USA)을 거쳐 엑시머레이저 절제를 하는 순서로 진행하였다. 이때 광학 구역은 6 mm, 총 절삭구역은 8 mm로 하였다. 수술 후에는 10 ml의 평형염액으로 세척한 다음 치료용 렌즈(Acuve Oasys, Johnson & Johnson)를 착용시켰다. 총 절삭량이 80 μm가 넘는 경우는 0.02% 마이토마이신 용액을 8 mm 직경의 Merocel 스폰지에 적신 후 각막 표면에 12초간 접촉하고 20 ml의 평형염액으로 세척하였다. 술 후 2개월간 1% prednisolone, 0.1% levofloxacin 점안약을 하루 네 번 점안하게 하고 무방부제 0.1% hyaluronate sodium 점안액을 수시로 점안하도록 처방하였다. 통증조절을 위해 술후 3일간은 0.1% diclofenac 점안액(voltaren, Novartis Korea)을 추가로 하루 네 번 점안하게 하였다.

매달 스넬렌 시력표로 나안시력을 측정하고 현성 굴절검사를 확인하였으며, 술후 6개월째 술후 웨이브프론트 검사를 시행하였다.

분석

웨이브프론트 데이터로부터, 구면값, 난시 정도, 평균 동공크기와 구면수차, 코마 및 세조각수차를 확인하여 이들

간의 연관성을 조사하였다.

각각의 대상안에서 스캔된 이미지로부터 구면값, 난시, 평균 동공크기와 구면수차의 최대값과 최소값을 구하고, 이들의 차이값을 검사 과정에서 발생할 수 있는 변화량(Δ)으로 간주하였다.

구면수차의 변화율(Unit ΔSA)은 구면수차의 변화량(ΔSA)을 구면값의 변화량($\Delta sphere$)으로 나누어 계산하였다. 같은 방법으로 동공크기의 변화율(Unit $\Delta pupil$)도 동공크기의 변화량을 구면값의 변화량으로 나누어 계산하였다.

통계 비교에는 Bivariate correlation과 Spearman correlation 모델을 사용하였고, 통계처리는 SPSS 프로그램 (version 13.0; SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하였으며, p -value의 유의수준은 0.05 미만으로 하였다.

결 과

환자들의 평균연령은 28.00 ± 3.12 (mean \pm SD, 23~33) 세였으며, 모두 여자였다. 현성굴절검사에서 구면대응값은 -4.55 ± 0.85 D (mean \pm SD)이며, 조절마비굴절검사에서는 -4.55 ± 0.89 D (mean \pm SD)였다. Table 1에 20안에 대한 검사 결과를 정리하였다.

편안한 분위기에서 검사하여 결과의 재현성을 높이기 노력했음에도, 수차계로 측정된 구면값은 각 스캔때마다 최대

4.75 D까지 차이가 났으며 평균 변화량은 2.12 ± 1.46 D (mean \pm SD, 범위 0.63~4.75 D)에 이르렀다. 원주값의 변화량은 구면값보다 적었지만 0.57 ± 0.20 D (mean \pm SD, 범위 0.36~1.33 D)로 확인되었다.

구면수차는 검사 과정에서 일관된 결과를 보이지 않았으며 평균변화량은 $0.19 \pm 0.1 \mu m$ (mean \pm SD, 범위 0.07~0.60)이었다. 검사 중 구면값의 변화($\Delta sphere$)가 큰 눈에서는 구면수차의 변화량(ΔSA)도 컸으며 서로 양의 상관관계가 있었다(Fig. 1).

수차계로 검사한 구면대응치(MRSE) 값이 현성굴절검사로 측정된 구면대응치값과 비슷했음에도 4명의 7안(35%)에서는 구면수차가 음의 값을 나타내었다(Table 1).

개별적으로 조절(구면값의 감소)에 따른 구면수차, 코마수차 및 세조각수차와 같은 고위수차 요인의 변화와 동공크기의 변화를 Spearman 상관 모델로 분석하였다. 9명의 13안(65%)에서 구면값의 감소에 따라 구면수차가 유의하게 감소하였다(Fig. 2). 4명의 5안(25%)에서는 구면값이 감소함에 따라 동공크기의 유의한 감소도 확인되었다. 그 외의 눈에서는 특별한 상관관계가 없었다(Fig. 3). 구면수차의 변화량(Unit ΔSA)은 $0.10 \pm 0.04 \mu m$, 동공크기의 변화량(Unit $\Delta pupil$)은 0.55 ± 0.37 mm이었다. 4명의 4안(20%)에서는 동공크기가 감소함에 따라 구면수차도 유의하게 감소하였다.

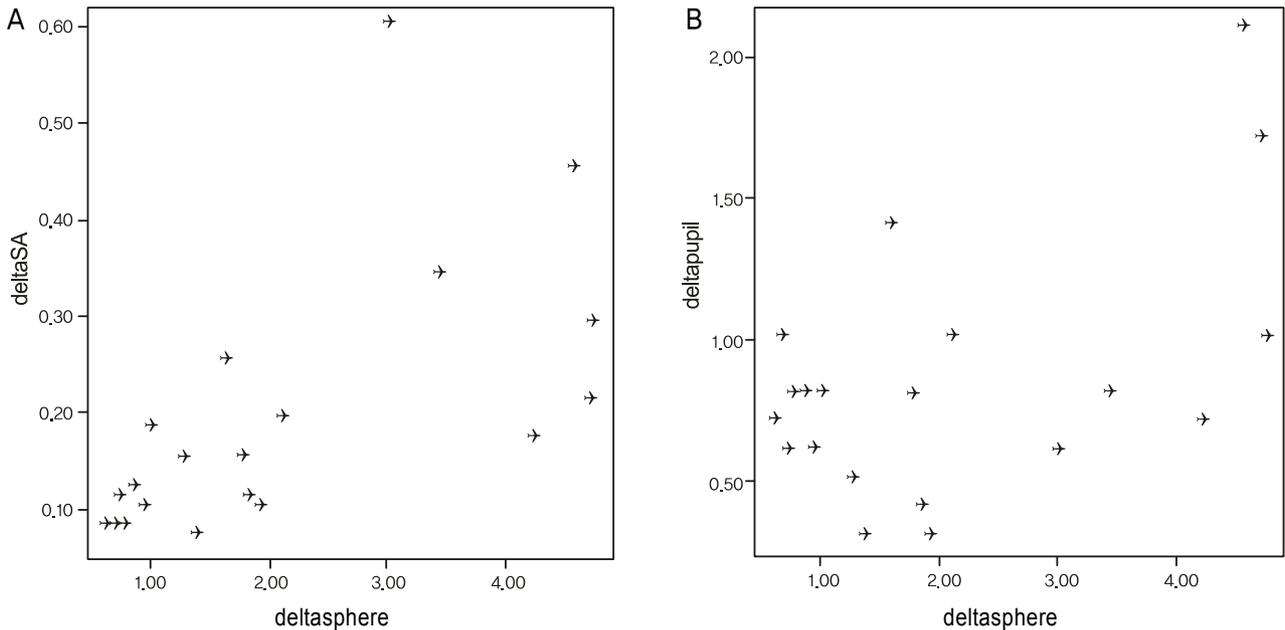


Figure 1. The correlation between the change in sphere ($\Delta sphere$) and the change in spherical aberration (ΔSA), (A), and the correlation between the change in sphere ($\Delta sphere$) and the change of pupil size ($\Delta pupil$), (B), were demonstrated. The spherical aberration decreased on average of $0.10 \pm 0.04 \mu m$ (mean \pm SD) as the sphere decreased 1 diopter ($\rho=0.747$, $p < 0.001$, Spearman's correlation test). The pupil size decreased on average 0.55 ± 0.37 mm as the sphere decreased 1 diopter ($\rho=0.526$, $p=0.017$, Spearman's correlation test).

Table 1. Descriptive data of 20 eyes included in this study

Patient No Sex/Age	R/L	MR (diopter)	CR (diopter)	Data from aberrometer					
				Pupil size Mean ± SD (Min/Max)	Sphere Mean ± SD (Min/Max)	Cylinder Mean ± SD (Min/Max)	Spherical aberration Mean ± SD (Min/Max)	Coma Mean ± SD (Min/Max)	Trefoil Mean ± SD (Min/Max)
1 F/28	R	-5.5-0.5 ×180	-5.5-0.5 ×180	8.33 ± 0.21 (8.0/8.6)	-7.47 ± 1.07 (-9.13/-6.11)	-0.68 ± 0.21 (-1.11/-0.33)	-0.31 ± 0.16 (-0.62/-0.02)	0.07 ± 0.05 (0.01/0.18)	0.16 ± 0.05 (0.08/0.24)
	L	-5.5-0.25 ×180	-5.5 ×180	8.71 ± 0.29 (8.3/9.1)	-7.99 ± 1.09 (-9.84/-6.38)	-0.56 ± 0.21 (-0.83/-0.18)	-0.34 ± 0.12 (-0.55/-0.21)	0.18 ± 0.14 (0.03/0.36)	0.13 ± 0.06 (0.03/0.21)
2 F/33	R	-4.25 ×180	-4.25-0.25 ×180	6.40 ± 0.31 (6.0/6.7)	-5.88 ± 1.12 (-8.13/-3.88)	-0.73 ± 0.16 (-1.02/-0.41)	0.01 ± 0.06 (-0.10/0.07)	0.09 ± 0.05 (0.04/0.18)	0.14 ± 0.05 (0.08/0.20)
	L	-4.25-0.5 ×180	-4.25-0.5 ×180	6.70 ± 0.34 (6.2/7.2)	-5.64 ± 1.73 (-8.63/-3.88)	-0.61 ± 0.22 (-0.93/-0.38)	0.01 ± 0.10 (-0.16/0.13)	0.14 ± 0.04 (0.06/0.23)	0.16 ± 0.04 (0.10/0.25)
3 F/32	R	-1.75-1.0 ×150	-1.75-0.75 ×150	6.00 ± 0.26 (5.6/6.4)	-1.97 ± 0.53 (-2.73/-0.94)	-1.44 ± 0.17 (-1.58/-1.08)	-0.00 ± 0.04 (-0.06/0.09)	0.09 ± 0.02 (0.06/0.12)	0.19 ± 0.03 (0.17/0.26)
	L	-3.75-0.5 ×180	-3.75-0.5 ×180	6.08 ± 0.27 (5.8/6.6)	-4.36 ± 0.32 (-4.76/-3.89)	-0.91 ± 0.20 (-1.09/-0.55)	-0.03 ± 0.04 (-0.09/0.03)	0.13 ± 0.07 (0.02/0.26)	0.14 ± 0.06 (0.05/0.20)
4 F/28	R	-4.5-0.5 ×170	-4.5-0.5 ×170	7.86 ± 0.14 (7.6/8.0)	-5.39 ± 0.67 (-6.15/-4.28)	-0.98 ± 0.12 (-1.14/-0.78)	0.06 ± 0.04 (0.01/0.12)	0.17 ± 0.05 (0.15/0.29)	0.19 ± 0.05 (0.10/0.28)
	L	-2.75-1.5 ×180	-2.75-1.5 ×180	7.65 ± 0.13 (7.5/7.8)	-3.31 ± 0.74 (-4.49/-2.55)	-2.00 ± 0.21 (-2.24/-1.72)	-0.02 ± 0.03 (-0.07/0.03)	0.12 ± 0.02 (0.09/0.17)	0.09 ± 0.04 (0.04/0.17)
5 F/23	R	-4.0-2.25 ×180	-3.5-1.75 ×180	6.89 ± 0.47 (6.2/7.6)	-4.31 ± 0.63 (-5.16/-3.53)	-2.67 ± 0.47 (-3.14/-1.81)	-0.13 ± 0.08 (-0.21/0.04)	0.12 ± 0.06 (0.02/0.22)	0.11 ± 0.03 (0.06/0.17)
	L	-4.25-1.5 ×180	-4.25-1.25 ×180	6.79 ± 0.36 (6.5/7.5)	-4.98 ± 0.70 (-6.01/-3.88)	-2.14 ± 0.18 (-2.33/-1.84)	-0.18 ± 0.06 (-0.25/-0.06)	0.17 ± 0.06 (0.06/0.25)	0.09 ± 0.03 (0.05/0.14)
6 F/27	R	-5.75-0.5 ×90	-5.75-1.0 ×90	6.36 ± 0.44 (5.3/7.0)	-7.83 ± 1.44 (-10.81/-6.08)	-0.88 ± 0.19 (-1.28/-0.63)	0.07 ± 0.06 (-0.06/0.15)	0.17 ± 0.09 (0.04/0.40)	0.09 ± 0.05 (0.04/0.20)
	L	-5.25-0.25 ×90	-5.25-0.25 ×90	6.13 ± 0.63 (4.4/6.5)	-7.97 ± 1.38 (-9.99/-5.41)	-0.44 ± 0.22 (-0.77/-0.23)	0.04 ± 0.11 (-0.13/0.32)	0.17 ± 0.09 (0.04/0.36)	0.11 ± 0.04 (0.04/0.20)
7 F/27	R	-4.25-0.25 ×180	-4.25 ×180	7.62 ± 0.20 (7.2/7.9)	-4.49 ± 0.22 (-4.82/-4.19)	-0.86 ± 0.16 (-1.09/-0.62)	-0.07 ± 0.02 (-0.12/-0.04)	0.32 ± 0.04 (0.27/0.40)	0.20 ± 0.04 (0.14/0.25)
	L	-4.25-0.5 ×30	-4.25-0.75 ×30	7.80 ± 0.16 (7.5/8.1)	-4.23 ± 0.25 (-4.78/-4.02)	-1.11 ± 0.17 (-1.26/-0.73)	-0.07 ± 0.04 (-0.11/0.00)	0.30 ± 0.06 (0.22/0.42)	0.25 ± 0.03 (0.19/0.30)
8 F/30	R	-4.25 ×90	-4.0-0.25 ×90	7.15 ± 0.22 (6.8/7.6)	-4.18 ± 0.35 (-4.71/-3.69)	-0.31 ± 0.15 (-0.56/-0.06)	0.22 ± 0.06 (0.14/0.32)	0.10 ± 0.03 (0.03/0.14)	0.19 ± 0.04 (0.13/0.28)
	L	-3.75-0.25 ×90	-3.75-0.25 ×90	7.23 ± 0.15 (7.0/7.5)	-3.17 ± 0.39 (-4.23/-2.93)	-0.35 ± 0.17 (-0.65/-0.04)	0.23 ± 0.05 (0.19/0.34)	0.31 ± 0.06 (0.23/0.41)	0.20 ± 0.03 (0.16/0.26)
9 F/28	R	-4.0-0.75 ×180	-3.75-0.5 ×180	6.10 ± 0.38 (5.6/6.4)	-3.97 ± 0.25 (-4.38/-3.60)	-0.86 ± 0.12 (-1.12/-0.70)	-0.03 ± 0.02 (-0.08/0.00)	0.07 ± 0.02 (0.04/0.10)	0.06 ± 0.01 (0.04/0.09)
	L	-3.5-0.75 ×180	-3.25-1.25 ×180	6.14 ± 0.38 (5.6/6.6)	-3.52 ± 0.23 (-3.71/-3.00)	-1.27 ± 0.13 (-1.46/-1.08)	-0.04 ± 0.02 (-0.08/0.00)	0.11 ± 0.03 (0.09/0.16)	0.11 ± 0.01 (0.09/0.13)
10 F/24	R	-4.75 ×180	-4.75 ×180	7.99 ± 0.22 (7.7/8.3)	-4.87 ± 0.27 (-5.36/-4.43)	-0.46 ± 0.14 (-0.79/-0.27)	0.05 ± 0.03 (-0.01/0.09)	0.19 ± 0.06 (0.08/0.27)	0.16 ± 0.06 (0.09/0.25)
	L	-4.75-0.25 ×180	-4.75 ×180	7.98 ± 0.12 (7.8/8.1)	-4.97 ± 0.37 (-5.79/-4.41)	-0.90 ± 0.13 (-1.17/-0.72)	0.03 ± 0.02 (0.00/0.07)	0.20 ± 0.03 (0.14/0.27)	0.08 ± 0.03 (0.06/0.15)

3명의 3안(15%)에서 구면값이 감소함에 따라 코마수차도 유의하게 감소하였다. 4명의 4안(20%)에서 구면값의 감소와 전체 고위수차 RMS가 유의한 상관이 있음이 보여 지지만, 양의 상관과 음의 상관이 함께 존재하였다. 세조각수차는 구면값과 상관관계를 보이지 않았다.

총 9안에서 음의 구면수차를 가진 웨이브프론트 데이터를 적용해 수술이 시행되었다(Table 2). 수술 후 구면대응값

은 대상안의 나안시력과 유의한 상관관계가 없었다. 레이저 굴절수술에 사용된 웨이브프론트 데이터의 구면수차는 술 후 구면대응값과의 연관성이 확인되지는 않았지만, 이들 구면수차와 술 후 나안시력간에는 유의한 상관관계가 있었다(Fig. 4). 수술에 적용된 웨이브프론트 데이터가 양의 값을 가질수록 나안시력은 유의하게 좋았다($p=0.033$, Spearman's correlation test).

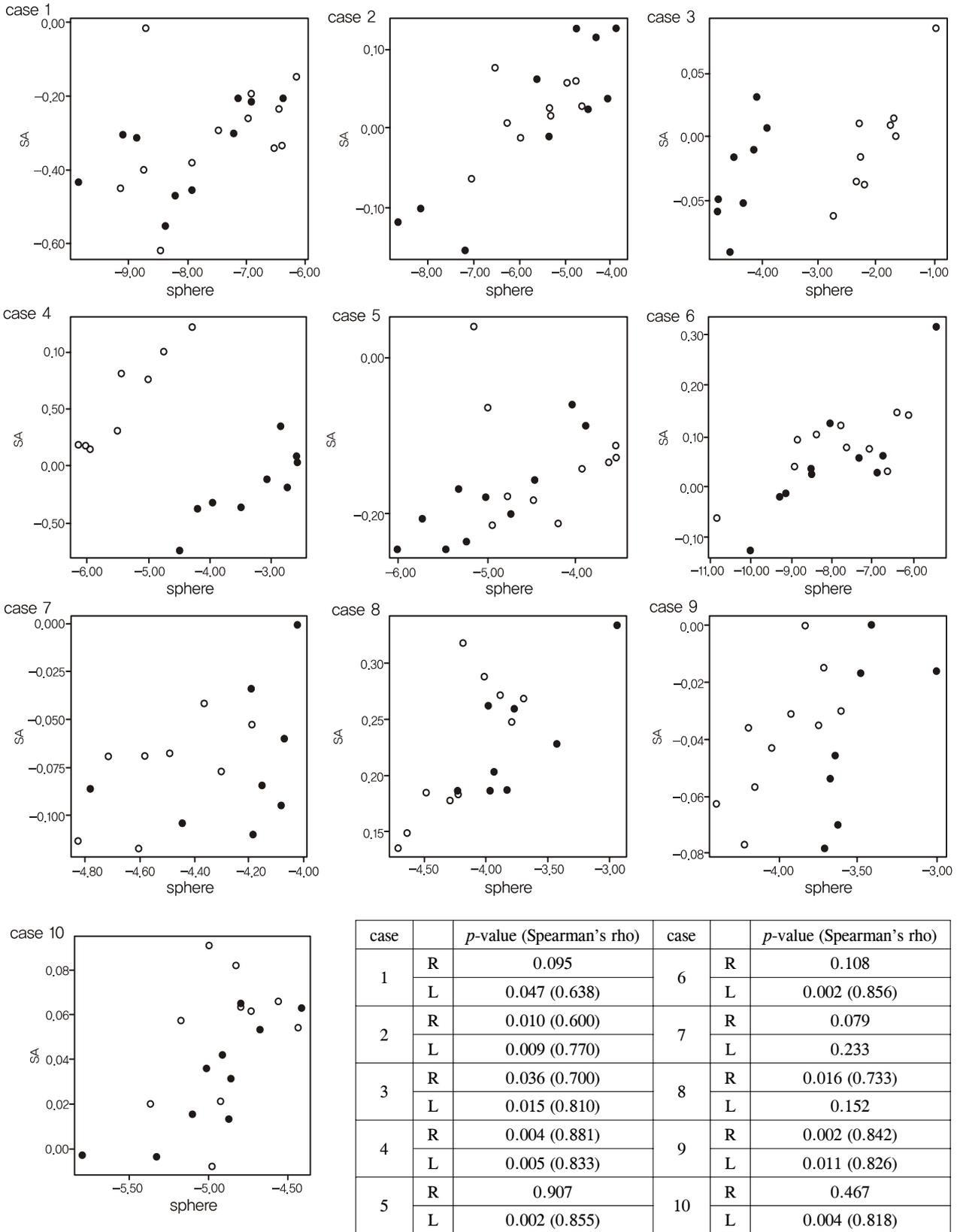


Figure 2. The change in spherical aberration according to the change in sphere in study eyes. The scatter plot showed that 13 eyes of 9 patients showed significant correlation between SA and sphere (refer to inserted table for Spearman's rho and *p*-value). Filled dots mean the values of the left eye and empty dots mean the values of the right eye.

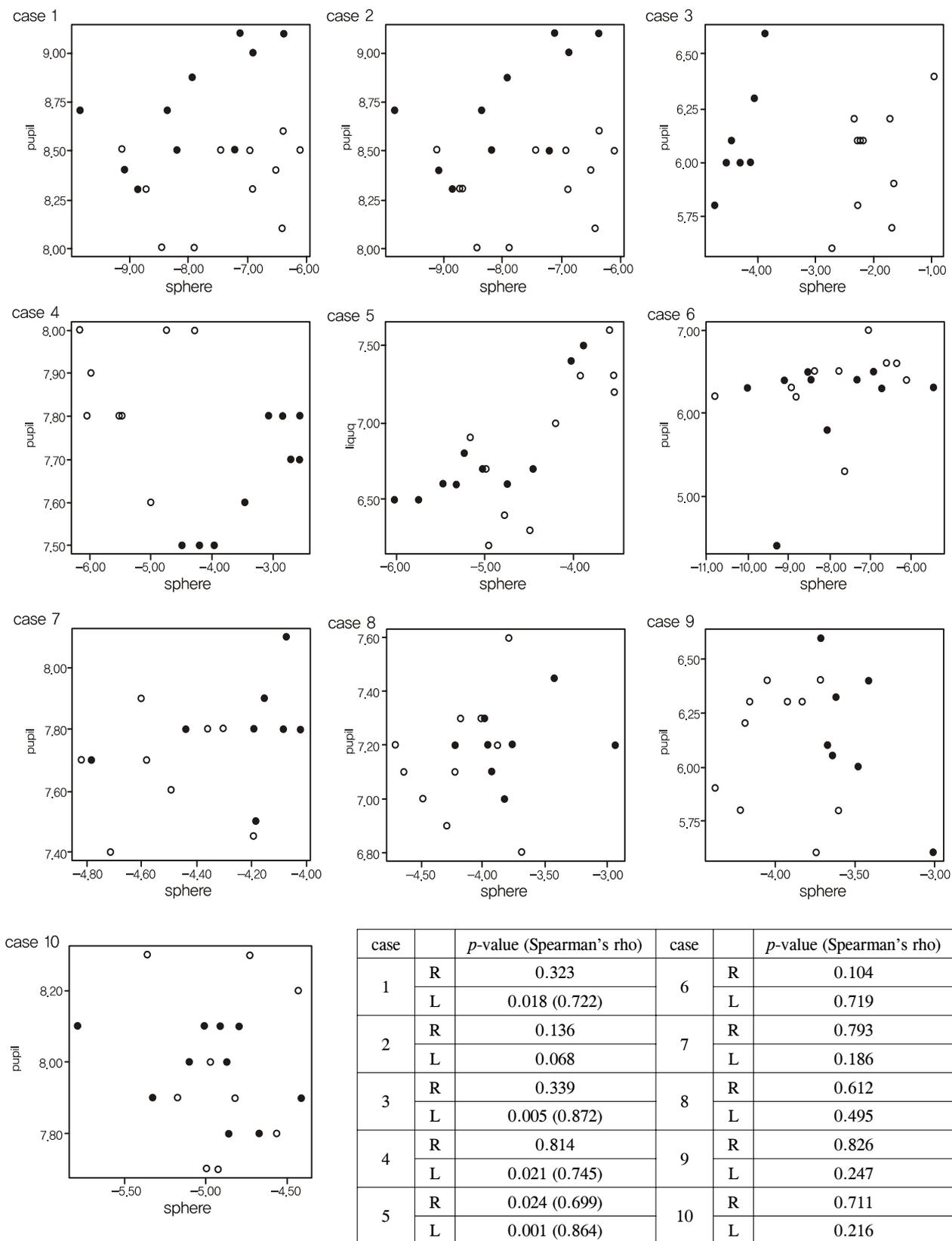


Figure 3. The change in pupil size according to the change in sphere in study eyes. The scatter plot showed that 5 eyes of 4 patients showed significant correlation between pupil size and sphere (refer to inserted table for Spearman's rho and *p*-value). Filled dots mean the values of the left eye and empty dots mean the values of the right eye.

Table 2. Refractive data of patients underwent the wavefront guided refractive surgery

Patient No Sex/Age	R/L	Preop MR (diopter)	Postop MR (diopter)	UCVA	Wavefront map used for surgery		
					Refraction	SA	Pupil size
1 F/28	R	-5.5-0.5 × 180	Plano-0.75 × 160	20/20	-6.11-0.52 × 178	-0.147	8.5
	L	-5.5-0.25 × 180	Plano-0.25 × 10	20/20	-6.38-0.49 × 175	-0.208	9.1
2 F/33	R	-4.25	-0.25-0.75 × 170	20/15	-4.62-0.69 × 171	0.026	6.7
	L	-4.25-0.5 × 180	Plano-0.5 × 10	20/15	-4.50-0.93 × 180	0.022	6.9
3 F/32	R	-1.75-1.0 × 150	+0.75-0.25 × 140	20/20	-2.20-1.58 × 156	-0.038	6.1
	L	-3.75-0.5 × 180	-0.5	20/15	-3.97-1.06 × 18	0.003	6.3
4 F/28	R	-4.5-0.5 × 170	-0.25	20/15	-4.74-1.12 × 168	0.100	8.0
	L	-2.75-1.5 × 180	+0.75-0.25 × 180	20/20	-2.75-1.92 × 178	0.039	7.5
5 F/23	R	-4.0-2.25 × 180	Plano-0.5 × 145	20/20	-3.92-2.64 × 8	-0.142	7.2
	L	-4.25-1.5 × 180	Plano	20/15	-4.46-1.98 × 178	-0.158	6.7
6 F/27	R	-5.75-0.5 × 90	+0.25	20/15	-6.08-0.81 × 69	0.140	6.4
	L	-5.25-0.25 × 90	+0.25	20/15	-5.41-0.72 × 120	0.315	6.3
7 F/27	R	-4.25-0.25 × 180	-0.25	20/25	-4.49-1.09 × 8	-0.068	7.6
	L	-4.25-0.5 × 30	-0.50-0.5 × 170	20/25	-4.19-1.18 × 180	-0.034	7.8
8 F/30	R	-4.25	-0.25	20/15	-4.18-0.15 × 96	0.318	7.3
	L	-3.75-0.25 × 90	+0.5-0.5 × 90	20/15	-3.83-0.41 × 2	0.187	7.0
9 F/28	R	-4.0-0.75 × 180	-0.25	20/20	-4.15-0.88 × 5	-0.057	6.3
	L	-3.5-0.75 × 180	Plano-0.25 × 150	20/15	-3.64-1.28 × 7	-0.042	5.6
10 F/24	R	-4.75	Plano-0.5 × 160	20/20	-4.99-0.42 × 175	0.091	7.7
	L	-4.75-0.25 × 180	-0.25-0.5 × 170	20/20	-5.01-0.88 × 6	0.036	8.1

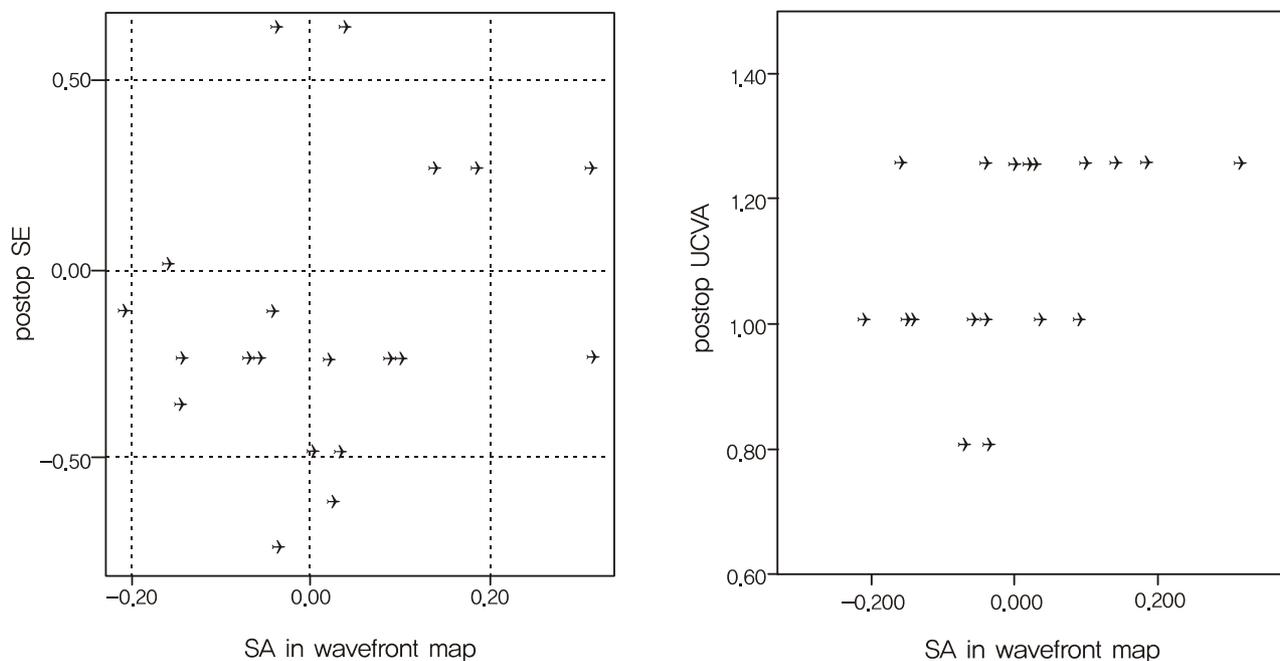


Figure 4. The correlation between the SA used for the laser vision correction and the postoperative spherical equivalent was not significant ($p=0.510$, Spearman's correlation test). However, UCVA showed the positive correlation with SA ($p=0.039$, $\rho=0.464$, Spearman's correlation test).

고 찰

본 연구는 굴절수술 대상자에게 일반적인 웨이브프론트
의 검사과정 중에도 고위수차의 일부 요인들에서 동적인

변화가 생길 수 있다는 것을 보여주었다. 그러나 이러한 변
화는 흔히 관찰되는 것이 아니고 개개인의 눈에 따라 매우
 다르다. 본 연구에서 대상자들의 65%에서는 조절과정 중
에 구면수차가 감소하였지만, 코마와 세조각 수차의 유의한

변화는 각각 15%와 0%에서만 발견되었다. 동공 크기는 암순응상태에서 검사하였을 때 조절과정으로 25%에서만 약간 감소하였다.

인간 눈의 광학수차는 시각 시스템 각각의 요소(각막, 수정체, 유리체)의 광학적인 질과 각 요소의 상대적 위치의 잘못된 배열 모두로 인해 발생한다. 이 때의 고위수차는 동적인 현상이고 나이, 동공의 크기, 조절을 포함한 여러 가지 인자들에 의해서 영향을 받는다. Dubbelman et al^{21,22}은 조절하려는 노력으로 인한 구면 수차의 음의 방향으로의 시프트를 설명하였다. 그들은 조절 과정에서 수정체 중심부의 상대적 비대와 수정체 앞면의 곡률 반경의 변화가 구면수차의 변화에 영향을 미친다고 하였다. Ninomiya et al²³은 다른 유형의 수차계를 사용한 연구에서 전체 고위수차가 변하지 않더라도 3D의 조절로 인해 유의하게 음의 구면수차가 유발될 수 있다고 하였다.

웨이브프론트 데이터를 이용한 레이저 굴절수술을 시행할 때, 환자의 웨이브프론트 오차를 최적으로 수정하기 위한 가장 적절한 맵을 선택하는 것이 무엇보다도 중요하다. 그러나 동일한 수차계에 의해서 얻어진 웨이브프론트 정보도 나이, 동공 크기, 조절 상태에 따라 일정하지 않았다. 따라서 레이저 굴절수술을 위한 웨이브프론트 데이터의 정확한 측정과 현명한 선택이 웨이브프론트 방식을 이용한 레이저 굴절수술의 성공을 위한 열쇠라고 할 수 있다. 일반적으로 굴절 각막수술을 위한 웨이브프론트 분석은 예측치 못한 모든 과교정을 피하기 위해 조절하지 않은 상태에서 측정하는 것이 추천되었다. 웨이브프론트 측정 중 의도하지 않은 환자의 조절은 신뢰하기 힘든 웨이브프론트 데이터를 만들어 낼 수 있고, 광학 수차의 과잉 또는 부족 교정을 야기할 수 있다. 그러므로 광학수차를 측정할 때 적절하고 편안한 상황을 제공하는 것이 중요하다. 웨이브프론트 데이터를 얻은 후에는 실제 광학 수차 상태를 가장 잘 반영하는 최적의 웨이브프론트 맵을 선택하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 특히 과잉 교정을 피하기 위하여, 최종적으로 사용할 맵을 선택하는 데 있어 먼저 현성굴절력 검사와 유사한 구면값과 난시값을 가지는 맵들은 선정한 이후 이들 맵에서 가장 양의 값의 구면 수차를 가지는 맵으로 수술을 진행하였다.

조절하려고 노력할 때 근시가 되기 때문에 구면 수차와 구면값 사이의 밀접한 상호 작용은 반드시 고려되어야 한다. 고위수차의 시각적 영향은 암순응 상태의 큰 동공에서 더 현저하다(평균적으로 6 mm 이상의 직경).

구면수차가 음의 값인 경우, 눈은 중심과 부위와 중심과 뒤쪽에 두개의 초점을 갖는다. Sturm의 원뿔에서의 최소차란원과 유사하게 큰 구면수차를 가지는 눈의 두 개의 초점

사이 어딘가에 전체적인 시야의 흐릿함을 최소로 하는 점이 있을 것이다. 그러므로 검영기에 의해 측정된 종례의 굴절값과 비교했을 때 음의 구면수차가 큰 눈에서 웨이브프론트 검사상 근시성 변화를 보이는 것이 가능하다. Seiler and Koller²⁴는 현성 난시에서 보이는 각막 비구면성(구면수차)의 영향에 관한 연구에서 저위수차와 고위수차 사이의 상호작용을 보고하였다. 임상에서 큰 음의 구면수차와 근시로 인해 과대평가된 웨이브프론트 맵을 사용하게 되면 치료는 예측치 못한 과교정과 원시를 초래할 수 있다. 그러므로 최적의 웨이브프론트 맵을 선택하기 위해서는 웨이브프론트 맵에서 구면수차에 관한 세심한 평가와 현성 굴절 검사의 결과와 웨이브프론트 데이터간의 구면값과 실린더값을 비교하는 것이 필요하다.

본 연구에서 0.55 ± 0.37 mm의 동공의 변화량은 암순응 상태에서 검사한 것을 고려할 때 조절보다 빛에 의해서 더 영향을 받는 것처럼 보인다. 생리학적으로 대광반사는 위둔덕(superior colliculus) 레벨의 덮개앞(pretecal) 핵에 의해서 조절되고, 근접반사는 중뇌에 위치한 후두-중뇌 경로(occipito-mesencephalic tract)에 의해 조절된다. 대광반사에서는 홍채가 뇌로부터 모든 원심성 자극을 받는 반면 근접반사에서는 홍채가 30%의 원심성 자극만을 받고 70%는 모양체가 받는다.²⁵ 본 연구에서는 동공의 크기가 조절 과정에서 유의한 변화를 보이지만, 구면 수차처럼 조절의 강력한 지표가 아니라는 것을 보여준다.

본 연구에서 저자들은 측정 당시 동공 크기에서의 고위수차 값만을 표시하고 동일한 동공 크기의 고위수차 값으로 변환하는 표준화 과정(Normalization)을 수행하지 않았다. 따라서, 측정할 때마다 동공의 크기가 달라져 고위수차의 측정값에 영향을 줄 수 있는 점을 반영하지 않은 것은 본 연구의 단점이라 하겠다.

요약하면, 저자들은 웨이브프론트 데이터의 획득과정에서 구면수차가 환자의 조절상태를 반영하는 유용한 변수가 된다고 제안한다. 펄스세컨드 레이저가 소개되는 등 레이저 굴절 수술 영역에서의 기술의 진보는 빠르고 끊임없이 이어져오고 있다. 그러나 오래되고 친숙한 기술의 더 나은 이해와 적용은 레이저 시각 교정의 결과를 개선하는 확실한 대안이 될 수 있다.

참고문헌

- 1) Charman WN. Wavefront aberration of the eye: a review. *Optom Vis Sci* 1991;68:574-83.
- 2) Maeda N. Wavefront technology in ophthalmology. *Curr Opin Ophthalmol* 2001;12:294-9.
- 3) Oshika T, Klyce SD, Applegate RA, et al. Comparison of corneal wavefront aberrations after photorefractive keratectomy and laser

- in situ keratomileusis. *Am J Ophthalmol* 1999;127:1-7.
- 4) Awwad ST, Bowman RW, Cavanagh HD, McCulley JP. Wavefront-guided LASIK for myopia using the LADAR CustomCornea and the VISX CustomVue. *J Refract Surg* 2007;23:26-38.
 - 5) Subbaram MV, MacRae SM. Does dilated wavefront aberration measurement provide better postoperative outcome after custom LASIK? *Ophthalmology* 2006;113:1813-7.
 - 6) Netto MV, Dupps W Jr, Wilson SE. Wavefront-guided ablation: evidence for efficacy compared to traditional ablation. *Am J Ophthalmol* 2006;141:360-8.
 - 7) Thibos LN, Applegate RA, Schwiegerling JT, Webb R; VSIA Standards Taskforce Members. Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *J Refract Surg* 2002;18:S652-60.
 - 8) Yoon G, Jeong TM, Cox IG, Williams DR. Vision improvement by correcting higher-order aberrations with phase plates in normal eyes. *J Refract Surg* 2004;20:S523-7.
 - 9) Applegate RA, Sarver EJ, Khemsara V. Are all aberrations equal? *J Refract Surg* 2002;18:S556-62.
 - 10) Guirao A, Williams DR. A method to predict refractive errors from wave aberration data. *Optom Vis Sci* 2003;80:36-42.
 - 11) Netto MV, Ambrósio R Jr, Shen TT, Wilson SE. Wavefront analysis in normal refractive surgery candidates. *J Refract Surg* 2005;21:332-8.
 - 12) Yoon G, Macrae S, Williams DR, Cox IG. Causes of spherical aberration induced by laser refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 2005;31:127-35.
 - 13) Roberts C. Biomechanics of the cornea and wavefront-guided laser refractive surgery. *J Refract Surg* 2002;18:S589-92.
 - 14) Kulkamthorn T, Silao JN, Torres LF, et al. Wavefront-guided laser in situ keratomileusis in the treatment of high myopia by using the CustomVue wavefront platform. *Cornea* 2008;27:787-90.
 - 15) Perez-Straziota CE, Randleman JB, Stulting RD. Visual acuity and higher-order aberrations with wavefront-guided and wavefront-optimized laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2010;36:437-41.
 - 16) Reinstein DZ, Neal DR, Vogelsang H, et al. Optimized and wavefront guided corneal refractive surgery using the Carl Zeiss Meditec platform: the WASCA aberrometer, CRS-Master, and MEL80 excimer laser. *Ophthalmol Clin North Am* 2004;17:191-210.
 - 17) Venter J. Wavefront-guided custom ablation for myopia using the NIDEK NAVEX laser system. *J Refract Surg* 2008;24:487-93.
 - 18) Cheng H, Barnett JK, Vilupuru AS, et al. A population study on changes in wave aberrations with accommodation. *J Vis* 2004;4:272-80.
 - 19) Iida Y, Shimizu K, Ito M, Suzuki M. Influence of age on ocular wavefront aberration changes with accommodation. *J Refract Surg* 2008;24:696-701.
 - 20) He JC, Burns SA, Marcos S. Monochromatic aberrations in the accommodated human eye. *Vision Res* 2000;40:41-8.
 - 21) Dubbelman M, Van der Heijde GL, Weeber HA. Change in shape of the aging human crystalline lens with accommodation. *Vision Res* 2005;45:117-32.
 - 22) Dubbelman M, Van der Heijde GL, Weeber HA, Vrensen GF. Changes in the internal structure of the human crystalline lens with age and accommodation. *Vision Res* 2003;43:2363-75.
 - 23) Ninomiya S, Fujikado T, Kuroda T, et al. Changes of ocular aberration with accommodation. *Am J Ophthalmol* 2002;134:924-6.
 - 24) Seiler T, Koller T. Asphericity of the cornea and astigmatism. *Klin Monbl Augenheilkd* 2005;222:977-82.
 - 25) Rosen ES, Eustace P, Thompson HS, Cumming WJK. *Neuroophthalmology*. London: Mosby, 1998;33-4.

=ABSTRACT=

Considering Spherical Aberration in Choosing the Wavefront Map for Laser Vision Correction

Sung Min Ahn, MD¹, Su Sie Seok, MD¹, Choul Yong Park, MD^{2,3}

*Department of Ophthalmology, Dongguk University, College of Medicine¹, Gyeongju, Korea
Department of Ophthalmology, Dongguk University, Graduate School of Medicine², Goyang, Korea
Department of Ophthalmology, Dongguk University, Ilsan Hospita³, Goyang, Korea*

Purpose: To report the dynamic nature of human optical aberrations in the scotopic condition.

Methods: A total of 20 eyes who were candidates for laser vision correction were included in the present study. Repeated wavefront data were obtained using WavescanTM (AMO/VISX). From the wavefront analysis data, the sphere, astigmatism, average pupil size, spherical aberration, coma and trefoil were selected and used to investigate any correlation among the parameters.

Results: The sphere, spherical aberration, coma and pupil size showed a dynamic change in the scotopic condition. The spherical aberration and pupil size decreased by the amount of $0.10 \pm 0.04 \mu\text{m}$ and $0.55 \pm 0.37 \text{ mm}$ as the sphere changed 1 D in myopic direction. There was significant positive correlation between the sphere and spherical aberration in 13 eyes of 9 patients (65%), between the sphere and pupil size in 5 eyes of 4 patients (25%), and between the sphere and coma in 3 eyes of 3 patients (15%). The spherical aberration decreased significantly in 4 eyes of 4 patients (20%) as the pupil size decreased.

Conclusions: The optical aberration of human eyes showed a dynamic nature in the scotopic condition. In particular, there was significant correlation between the sphere and spherical aberration. The observed correlations have the potential to be used as helpful indicators to select the optimal wavefront data for the laser vision correction.

J Korean Ophthalmol Soc 2011;52(2):147-156

Key Words: Spherical aberration, Wavefront-guided laser vision correction

Address reprint requests to **Choul Yong Park, MD**
Department of Ophthalmology, Dongguk University Ilsan Hospital
#814 Siksa-dong, Ilsandong-gu, Goyang 410-773, Korea
Tel: 82-31-961-7395, Fax: 82-31-961-7977, E-mail: cpark@duih.org