

고등각막표면굴절교정레이저절제술에서 근시교정량이 고위수차의 장기간 변화에 미치는 효과

김진선 · 이상범

영남대학교 의과대학 안과학교실

목적: 고등각막표면굴절교정레이저절제술(ASA-PRK)에서 근시교정량에 따른 술 후 고위수차의 장기간 변화를 알아보고자 하였다.
대상과 방법: ASA-PRK를 시행한 101명 193안을 근시교정량의 중앙값에 따라 두 군으로 나누었다(1군 $\leq -4.37D$, 97안, 평균 $-3.26 \pm 0.77D$; 2군 $> -4.37D$, 96안, 평균 $-5.77 \pm 1.00D$). 술 전과 술 후 1, 3, 6, 12, 24개월에 수차계로 총파면고위수차, 코마, 세조각 및 구면수차를 측정하였고, 그 변화를 통계적으로 분석하였다.
결과: 세조각수차를 제외한 총파면고위수차, 코마 및 구면수차는 각 군별로 술 후 1, 3, 6, 12, 24개월에 술 전에 비해 증가하였고($p < 0.05$), 그 증가는 1군보다 2군이 더 심하였다($p < 0.05$). 그 수차의 변화량은 단기간(1개월까지)에만 1군보다 2군이 높았고($p < 0.05$), 중기간(1~6개월)과 장기간(6~24개월)에서는 두 군 간 차이가 없었다.
결론: 술 후 총파면고위수차, 코마 및 구면수차는 근시교정량이 많은 2군에서 더 높은 증가를 보였다. 그 증가는 술 후 1개월까지의 단기간 변화에 기인하였으며 2년 동안 술 전 값으로 회귀 없이 유지되었다.
(대한안과학회지 2010;51(9):1184-1195)

각막굴절수술에서 안전의 중요성이 강조됨에 따라 최근 굴절교정레이저각막절제술(photorefractive keratectomy, PRK)을 포함한 각막표면연마 굴절수술의 관심이 새롭게 높아지고 있다.¹⁻³ PRK 수술의 장점으로는 우선 라식(laser in situ keratomileusis, LASIK)에서 발생하는 심각한 절편 관련 합병증이 없고 각막확장증의 위험성이 적은 것을 들 수 있으며, 또한 수술 후 고위수차의 발생이 LASIK보다 상대적으로 적다는 점과 장기간의 추적관찰을 통해 그 안전성이 입증되었다는 점 등을 들 수 있다.⁴⁻⁹ 그러나 PRK 수술에서 상피를 제거하는 술기상의 특성 때문에 수술 후 통증, 긴 시력회복 기간, 각막 간질의 혼탁 및 근시로의 퇴행 등의 단점들이 문제점으로 지적되었다.^{10,11} 이러한 단점들을 극복하기 위하여 본 저자들은 상피제거회전술, 차가운 평형염액, 안대렌즈, 무보존제 점안약 및 눈추적장치 등의 이용을 특징으로 하는 술기를 고등각막표면굴절교정레이저절제술(advanced surface ablation-photorefractive keratectomy,

ASA-PRK)이라 보고한 바 있다.¹² 그에 따라 각막 연마 표면의 질이 개선되었고 상피 재생이 빨라져 우수한 수술 성적과 높은 환자 만족도를 얻을 수 있었다.

지금까지 각막굴절수술은 경중등도 근시안에서 우수한 시력 교정 효과와 안정성을 보여주고 있다. 그러나 최근 활발한 고위수차 연구가 진행되면서 각막굴절수술 후 고위수차의 증가가 확인되었고, 그로 인해 대비감도 감소, 흐려보임 및 눈부심 증가 등의 환자 시력의 질적 저하가 또 다른 문제점으로 대두되었다.¹³⁻¹⁹ 실제로 각막굴절수술 후 고위수차의 증가 원인에는 여러 가지가 있다. 수술 전 고위수차의 크기가 중요한 원인 중 하나이며, 그 외에도 연마중심이 탈, 수술교정량, 각막의 비구면성과 불규칙성, 각막혼탁, 창상치유, 동공크기 및 수술 후 시간 경과 등도 수술 후 고위수차 증가의 원인으로 보고되어 있다.¹⁸⁻²⁵

그 중 수술교정량이 수술 후 고위수차 발생에 미치는 영향과 관련하여 일반적으로 수술교정량이 증가할수록 수술 후 고위수차 발생이 증가한다고 알려져 있다.^{9,19-21,25-28} 그러나 이러한 연구들은 대상 환자의 수가 적었으며,^{9,19,26,27} 장기간의 변화를 포함하고 있지 않았으며,^{19,25,26} 절편과 관련된 고위수차 발생 영향을 배제하지 못하였고,²⁶⁻²⁸ 또한 교정량과 시간 경과에 따른 변화를 동시에 분석하지 못하여 여러 제한점을 가지고 있었다. 또한 수술 방법과 관련하여, 수술 후 고위수차의 증가는 LASIK보다는 PRK나 라섹(laser epithelial keratomileusis, LASEK)과 같은 각막표

■ 접 수 일: 2010년 1월 18일 ■ 심사통과일: 2010년 6월 13일

■ 책임저자: 이 상 범

대구시 남구 대명동 317-1
영남대학교병원 안과
Tel: 053-620-3445, Fax: 053-626-5936
E-mail: sbummlee@med.yu.ac.kr

* 본 논문의 요지는 2009년 대한안과학회 제101회 학술대회에서 포스터로 발표되었음.

면연마술에서 상대적으로 적게 발생하는 것으로 보고되고 있다.^{8,9,29,30} 이에 근거하여 본 연구에서는 표면연마술에만 국한하여 수술 후 고위수차 증가의 정도를 분석함으로써 LASIK에서 절편 제작으로 인해 유도되는 고위수차 증가 부분에 따른 연구 결과 해석의 오류를 배제하고 수술교정량 자체가 미치는 영향만을 보다 더 객관적이고 정확하게 분석하고자 하였다.

이에 본 연구에서는 ASA-PRK에서 수술 전 근시교정량이 수술 후 고위수차 발생에 미치는 장기간의 영향을 알아 보고자 하였다.

대상과 방법

대상 환자

영남대학교병원 안과에서 2002년 9월부터 2008년 9월 까지 근시교정을 위해 ASA-PRK를 시행한 환자 101명 193안을 대상으로 하였다. 환자의 평균 나이는 25.6 ± 5.6 세 (18~44세)였고, 성별은 여자가 62명 122안이고 남자가 39명 71안이었으며, 평균 수술 전 구면렌즈대응치는

$-4.51 \pm 1.54D$ ($-1.75 \sim -9.25D$)이었다(Table 1).

수술 전 검사

수술 전에 모든 환자를 대상으로 나안 및 교정시력 측정과 현성 및 조절마비 굴절검사, 자동각막굴절곡률 측정, 압평안압계를 이용한 안압 측정, 간접검안경을 이용한 안저검사, 각막두께 측정, 각막지형도검사, 파면수차 측정 등을 시행하였다. 수술 전 현성굴절검사는 모든 환자에서 1주일 간격을 두고 3번 이상 시행하였다.

수술교정량은 조절마비굴절검사, 자동굴절검사 및 파면수차검사의 굴절값을 모두 고려하여 수술자(S.B.L.)가 직접 시행한 각 환자의 현성굴절검사를 기초로 결정하였다. 각 환자의 수술 전 근시와 난시의 굴절이상을 모두 교정하는 것을 원칙으로 하였으며 수술 후 정시가 되는 것을 목표로 하였다.

소프트나 하드콘택트렌즈를 착용한 환자는 각각 검사 14일과 21일 이전에 사용을 중지할 것을 지시하였다. 다른 동반된 안과적 질환이 있거나 창상치유를 지연시킬 수 있는 전신 질환이 있는 경우에는 수술에서 제외하였다. 모든 환

Table 1. Patient demographics and baseline characteristics of 193 eyes according to amount of myopic correction before ASA-PRK

Characteristics	Overall	Group I	Group II	p-value
Number of eyes	193	97	96	
Gender (male/female)	71/122	27/70	44/52	0.010 [†]
Laterality (OD [‡] /OS [§])	97/96	47/50	50/46	0.614 [†]
Age (yr)				
Mean \pm SD [#]	25.6 ± 5.6	26.6 ± 5.8	24.7 ± 5.2	0.211 [*]
Range	18 to 44	18 to 44	18 to 43	
Spherical equivalent (D)		$\leq -4.37D$	$> -4.37D$	
Mean \pm SD	-4.51 ± 1.54	-3.26 ± 0.77	-5.77 ± 1.00	0.000 [*]
Range	-1.75 to -9.25	-1.75 to -4.37	-4.44 to -9.25	
Sphere (D)				
Mean \pm SD	-4.24 ± 1.45	-3.09 ± 0.73	-5.41 ± 1.00	0.000 [*]
Range	-1.6 to -9.00	-1.60 to -4.37	-3.37 to -9.00	
Cylinder (D)				
Mean \pm SD	-0.51 ± 0.54	-0.34 ± 0.43	-0.69 ± 0.58	0.000 [*]
Range	0 to -2.60	0 to -2.25	0 to -2.60	
Pachymetry (μm)				
Mean \pm SD	542.7 ± 29.8	539.4 ± 30.1	546.2 ± 29.3	0.113 [*]
Range	489 to 629	489 to 617	493 to 629	
Ablation depth (μm)				
Mean \pm SD	53.41 ± 17.13	39.79 ± 8.99	67.35 ± 11.15	0.000 [*]
Range	21 to 103	21 to 56	43 to 103	
Residual thickness (μm)				
Mean \pm SD	489.1 ± 32.3	499.1 ± 31.7	478.9 ± 29.7	0.000 [*]
Range	429 to 586	441 to 579	429 to 586	
Ablation decentration (mm)				
Mean \pm SD	0.27 ± 0.15	0.26 ± 0.14	0.29 ± 0.16	0.167 [*]
Range	0.04 to 0.83	0.04 to 0.83	0.04 to 0.75	

*independent t-test; [†] χ^2 test; [‡]OD = right eye; [§]OS = left eye; ^{||}D = diopters; [#]SD = standard deviation.

자에게 수술 절차와 주의점, 수술 후 합병증에 대하여 충분히 설명하고 수술동의서를 받았다.

수술자 지정 연마중심을 이용한 ASA-PRK 수술 방법

모든 ASA-PRK 수술은 동일한 수술자(S.B.L.)에 의해 시행되었다. 국소마취 점안약으로 0.5% proparacaine hydrochloride (Alcaine®, Alcon Laboratories Inc., USA)를 2분 간격으로 3번 점안한 후 개검기로 수술할 눈의 안검을 벌렸으며 반대 눈은 차폐하였다. 안구를 Fixation ring (Katena Products Inc., USA)으로 고정한 후에 상피제거 회전술(Amoils epithelial scrubber®, Innovative Excimer Solutions Inc., Canada)로 상피를 신속히 제거하였다. Beaver® blade (#5700, Alcon Laboratories Inc., USA)를 이용하여 노출된 각막 표면의 물기를 깨끗이 닦았다. 수술자가 ActiveTrak™ 화면의 수직척도값³¹(vertical scale bar, %; 눈추적장치 결절 동공중심으로부터 수술자 지정 연마중심 간의 거리를 나타내는 척도)을 고려하여 각 환자의 연마중심을 지정한 후, 눈추적장치(ActiveTrak™ eye-tracker)가 장착된 VISX STAR S4 (VISX STAR S4 ActiveTrak™ with version 4.61 software, AMO Inc., USA) 장비를 이용하여 엑시머 레이저 조사를 시행하였다. 상피제거 시작에서 눈추적장치의 수직척도값 확인을 포함하여 실제 연마가 시작되는 사이의 시간은 각 수술에서 약 20초가 되도록 하여, 노출 연장으로 인한 각막간질의 수화 정도의 변화를 최소화하도록 노력하였다. 눈추적장치(VISX ActiveTrak™)는 동공의 자연적인 상태에서 60 Hz의 속도로 x-, y-, 및 z-축에서 추적하였다. 에너지 밀도는 180 mJ/cm², 반복률은 10 Hz, 치료범위는 6 mm로 하였다. 파면유도각막절제 방식은 적용되지 않았으며 기존의 표준 방식 프로그램(single and multi-pass multi-zone conventional algorithms)에 의해 중심부에서 주변부로 레이저를 조사하였다.

연마중심의 지정은 수술자에 의해 다음과 같이 시행되었다. VISX 기종의 수술 현미경에서는 3-mm, 6-mm 동심원과 중심부의 십자선이 환자의 각막 위에 제시된다. 눈추적장치의 정상적인 작동을 위해 수술현미경의 조도를 낮추어 환자의 동공 크기가 3 mm 이상이 되도록 하였다. 환자로 하여금 엑시머 레이저의 주시등을 정확히 볼 것을 지시한 후, 수동중심잡기방식(manual centering mode)으로 중심부의 십자선을 수술현미경하 보여지는 동공 중심에서 각막의 기하학적 중심 쪽으로 보정하여 맞추고 연마중심을 지정하였다. 수술자에 의한 연마중심의 하이측 보정은 각 환자의 고유한 동공 위치에 따라 눈추적장치 화면에 나타나는 수직척도값을 고려하여 눈추적장치의 정상적인 작동이

허락되는 범위(0.5 mm) 내에서 이루어졌다. 동시에 수술자는 6-mm 동심원을 각막윤부와 같은 중심을 가지도록 위치시키는 데 집중하여 동심원의 위치가 어느 한 사분면으로도 확연하게 치우치지 않도록 노력하였다. 만일 선택된 연마중심의 위치가 원하는 수직척도값의 최적 범위 내에 있지 않을 경우 만족스런 값을 보일 때까지 수동중심잡기를 반복 시행하였다.

수술 후 처치

레이저 조사 후 바로 각막을 4℃의 차가운 평형염액(BSS®, Alcon Laboratories Inc., USA) 10 ml로 2분간 세척하였다. 그 후 0.3% levofloxacin (Cravit®, Santen Inc., Japan), 0.1% diclofenac sodium (Voltaren® SDU, Novartis, Switzerland) 및 1% cyclopentolate hydrochloride (Cyclogyl®, Alcon Laboratories Inc., USA)를 점안하고 안대렌즈(Focus®, CIBA Vision Ltd., USA)를 착용시켰다.

보존제가 없는 0.3% levofloxacin과 0.1% diclofenac sodium을 상피재생이 완료될 때까지 하루에 4번 점안하였고, 안대렌즈는 상피재생이 완료된 후 제거하였다. 상피가 재생된 후에는 0.1% fluorometholone acetate (Flarex®, Alcon Laboratories Inc., USA)와 0.1% sodium hyaluronate (Hyalein® 0.1%, Santen Inc., Japan)를 첫 1달 동안 하루 4번 점안하였고 다음 3달 동안은 월 1회씩 점안 횟수를 줄였다.

근시교정량에 따른 대상군 분류

전체 대상안의 근시교정량의 중앙값을 기준으로 193안을 두 군으로 나누었다(1군: 근시교정량 $\leq -4.37D$, 97안, 평균 $-3.26 \pm 0.77D$; 2군: 근시교정량 $> -4.37D$, 96안, 평균 $-5.77 \pm 1.00D$). 수술 전 두 군의 분석에서 성별과 수술 전 난시값 이외에 나이, 좌우안, 각막두께, 연마중심이탈 정도에 통계적으로 유의한 차이는 없었다($p \geq 0.05$, independent t -test) (Table 1). 총파면고위수차, 코마, 세조각수차 및 구면수차를 포함한 모든 수술 전 고위수차는 두 군 간에 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p \geq 0.05$, independent t -test) (Table 2).

파면수차의 측정과 고위수차의 분석

Hartmann-Shack 파면검출기 방식을 적용한 수차계(WaveScan WaveFront™ System, AMO Inc., USA)를 이

Table 2. Change of higher-order wavefront aberrations according to the amount of myopic correction during postoperative 24 months

Group		RMS ^{II} and Zernike Coefficient (μm)					
		Preop [†]	Postop [‡] 1 m [§]	3 m	6 m	12 m	24 m
Total HOA [#]	Total	0.257 ± 0.088	0.423 ± 0.138	0.418 ± 0.145	0.434 ± 0.159	0.437 ± 0.168	0.393 ± 0.168
	I	0.259 ± 0.082	0.384 ± 0.130	0.384 ± 0.133	0.404 ± 0.134	0.396 ± 0.142	0.330 ± 0.113
	II	0.256 ± 0.095	0.464 ± 0.135	0.453 ± 0.148	0.460 ± 0.175	0.469 ± 0.180	0.451 ± 0.187
	p-value	0.800	0.000*	0.002*	0.023*	0.022*	0.002*
Coma	Total	0.134 ± 0.082	0.234 ± 0.128	0.236 ± 0.125	0.261 ± 0.150	0.253 ± 0.155	0.227 ± 0.137
	I	0.130 ± 0.080	0.203 ± 0.115	0.213 ± 0.114	0.230 ± 0.133	0.219 ± 0.148	0.177 ± 0.098
	II	0.137 ± 0.084	0.265 ± 0.132	0.258 ± 0.132	0.281 ± 0.159	0.279 ± 0.156	0.272 ± 0.153
	p-value	0.560	0.001*	0.019*	0.033*	0.049*	0.005*
Trefoil	Total	0.129 ± 0.072	0.160 ± 0.095	0.147 ± 0.079	0.147 ± 0.091	0.148 ± 0.083	0.130 ± 0.083
	I	0.130 ± 0.070	0.170 ± 0.107	0.150 ± 0.088	0.159 ± 0.097	0.165 ± 0.092	0.143 ± 0.090
	II	0.127 ± 0.074	0.150 ± 0.080	0.143 ± 0.070	0.137 ± 0.085	0.134 ± 0.075	0.122 ± 0.076
	p-value	0.731	0.162	0.531	0.127	0.059	0.419
Spherical aberration	Total	0.078 ± 0.056	0.178 ± 0.139	0.203 ± 0.135	0.232 ± 0.154	0.243 ± 0.154	0.210 ± 0.162
	I	0.081 ± 0.059	0.157 ± 0.110	0.181 ± 0.117	0.202 ± 0.135	0.198 ± 0.129	0.148 ± 0.113
	II	0.076 ± 0.054	0.200 ± 0.161	0.225 ± 0.148	0.258 ± 0.166	0.277 ± 0.163	0.266 ± 0.181
	p-value	0.534	0.041*	0.038*	0.021*	0.008*	0.003*

Values are RMS for total HOA and Zernike coefficients for coma, trefoil, and spherical aberration (μm, mean ± SD). Group I: myopic correction ≤ -4.37D (n = 97), Group II: myopic correction > -4.37 D (n = 96). Numbers of eyes in group I and II (97/96 preoperatively) at each postoperative follow-up visits were 91/89 at 1 month, 84/84 at 3 months, 74/84 at 6 months, 46/61 at 1 year, and 29/32 at 2 years.

*p < 0.05 (independent t-test) compared between group I and II; [†]Preop = preoperative; [‡]Postop = postoperative; [§]m = months; ^{II}RMS = root mean square; [#]HOA = higher-order wavefront aberration.

용하여 각 환자의 파면수차를 수술 전과 수술 후 1, 3, 6, 12 및 24개월에 측정하였다. 모든 파면수차는 10분간의 암순응 후 생리적으로 자연적인 동공 확대 상태에서 측정하였으며, 조절을 최소화하기 위하여 수차계의 optical head의 터널이 끝나는 부위의 주시등(fogged fixation target)을 응시하게 하면서 시행하였다. 측정값은 동공 지름 6 mm를 기준으로 얻었다.

고위수차의 분석은 임상적 유용성을 고려하여 제니케다항식에서 코마(coma, Z₃₁), 세조각수차(trefoil, Z₃₃) 및 구면수차(spherical aberration, Z₄₀)로 제한하였다. 파면수차 분석을 위해 총파면고위수차(total higher-order wavefront aberration, total HOA)를 비교하는 데는 RMS (root mean square, μm)를 지표로 사용하였으며, 또 개별 수차인 코마, 세조각수차 및 구면수차를 비교하는 데는 산출된 제니케계수(Zernike coefficients, μm)에서 위상차를 무시한 절대값을 지표로 이용하였다.

수술 전과 수술 후의 24개월 동안 두 군 간의 총파면고위수차, 코마, 세조각수차 및 구면수차를 비교 분석하였다. 두 군 간의 고위수차의 변화량을 세 기간으로 나누어(단기간: 수술 후 1개월 값과 수술 전 값의 차이; 중기간: 수술 후 6개월 값과 수술 후 1개월 값의 차이; 장기간: 수술 후 24개월 값과 수술 후 6개월 값의 차이) pair-wise manner 방식으로 비교 분석하였다.

통계학적 분석

각 군에서 수술 후 1, 3, 6, 12 및 24개월의 각 고위수차 값의 수술 전 값과의 비교와 각 군에서 인접한 경과관찰 기간 간의 고위수차 값 비교를 위해서 paired t-test를 이용하였다.

두 군간의 수술 전 고위수차 값 비교와 두 군 간의 수술 후 각 경과관찰 기간에서 수술로 인해 증가된 고위수차 값의 비교, 그리고 두 군 간에 세 기간으로 나눈 동안의 고위수차의 변화량의 비교를 위해 independent t-test를 이용하였다.

근시교정량과 수술로 인한 고위수차 발생량 사이의 상관관계는 단순 회귀분석을 통하여 파악하였다. 자료의 통계처리는 SPSS 통계프로그램 version 15.0을 이용하였으며, p 값이 0.05 미만인 경우를 통계적인 의의가 있는 것으로 간주하였다.

결 과

근시교정량에 따른 수술 후 고위수차의 변화와 상관관계 분석

Table 2에서 근시교정량에 따른 고위수차의 변화를 수술 전과 수술 후 24개월에 걸쳐 RMS와 제니케계수로 나타내었다. 조사된 각 시점에서의 추적 환자 수가 달라 그에 따

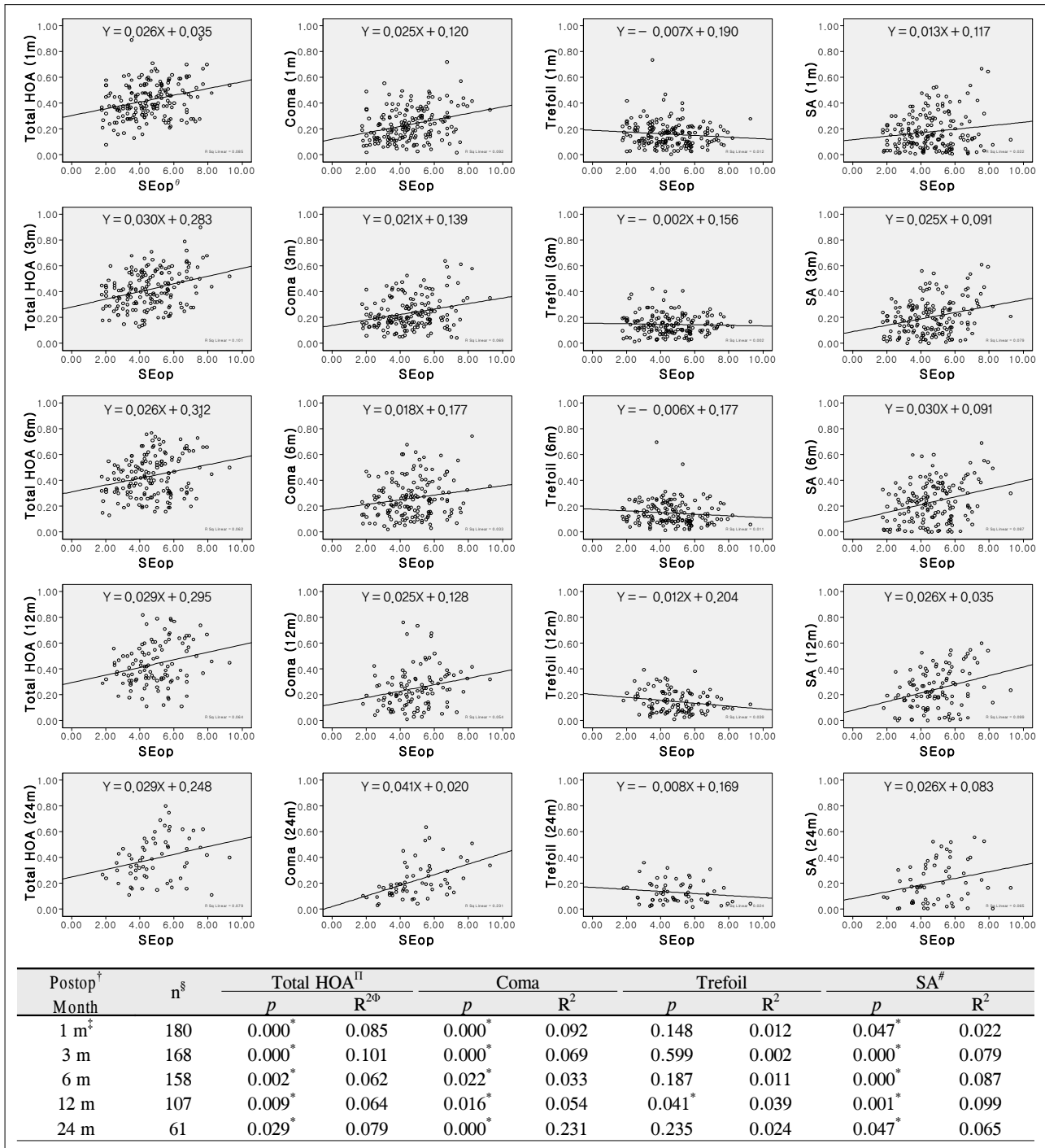


Figure 1. The relationship between ASA-PRK-induced HOAs including total HOA, coma, trefoil, and spherical aberration and the amount of myopic correction for overall 193 eyes.

* $p < 0.05$, simple linear regression analysis; [†]Postop = postoperative; [‡]m = months; [§]n = number of eyes; [¶]HOA = higher-order wavefront aberration; [#]SA = spherical aberration; ^ΦR² = regression coefficients; ^θSEop = spherical equivalent at operation.

큰 각 시점에서의 근시교정량 변화가 초래되지 않았는지에 대한 선행 확인이 필요하였다. 그 결과, 비교하고자 하는 각 경과관찰 시점에서의 근시교정량 평균은 1, 2군별로 수술 전 값과 통계적 차이를 보이지 않음이 확인되었다($p \geq 0.05$, paired t -test). 비교하고자 하는 네 가지 고위수차의 수술

전 값도 두 군 간에 통계적 차이를 보이지 않았다($p \geq 0.05$, independent t -test).

수술 후 1, 3, 6, 12 및 24개월에서의 각 고위수차 값을 수술 전 값과 비교하였을 때, 두 군 모두에서 총파면고위수차, 코마 및 구면수차의 각 경과관찰 시점에서의 값들은 수

술 전 값에 비해 통계적으로 유의한 증가를 나타내었다 ($p < 0.05$, paired t -test). 즉, 수술 후 1개월에 수술 전에 비해 유의하게 증가한 총파면고위수차, 코마 및 구면수차 값들은 수술 후 24개월까지 수술 전 값에 대비한 유의한 증가 상태가 유지되었다. 그 중 총파면고위수차 값을 보면 1군에서 수술 전 $0.259 \pm 0.082 \mu\text{m}$ 에서 수술 후 1개월에 $0.384 \pm 0.130 \mu\text{m}$ ($p = 0.000$, paired t -test)로, 2군에서는 수술 전 $0.256 \pm 0.095 \mu\text{m}$ 에서 수술 후 1개월에 $0.464 \pm 0.135 \mu\text{m}$ ($p = 0.000$, paired t -test)로 각각 통계학적으로 유의한 증가를 나타내었다. 이러한 수술 후 증가된 고위수차 값들을 두 군 간에 비교하였을 때, 총파면고위수차, 코마 및 구면수차는 수술 후 1, 3, 6, 12 및 24개월의 각 경과관찰 시점에서 통계적으로 유의하게 2군이 1군에 비하여 더 높았다($p < 0.05$, independent t -test) (Table 2).

근시교정량과 수술로 인해 유발된 고위수차 간의 상관관계를 보여주는 산포도와 선형회귀분석을 Fig. 1에 나타내었다. 총파면고위수차, 코마 및 구면수차는 수술 후 1, 3, 6,

12 및 24개월의 모든 경과관찰 시점에서 근시교정량이 증가할수록 수술로 인해 유발되는 고위수차 값이 증가하는 약한 양의 상관관계를 나타내었다($p < 0.05$, simple linear regression analysis). 세조각 수차의 경우 수술 후 12개월에서만 아주 약한 음의 상관관계를 보였다($p = 0.041$, simple linear regression analysis) (Fig. 1).

수술 후 고위수차의 시간 경과에 따른 변화 추이와 세기간으로 나눈 변화량 비교

Fig. 2, 3에서 1군과 2군별 총파면고위수차, 코마, 세조각수차 및 구면수차의 수술 후 2년간의 변화 추이와 통계적 분석 결과를 나타내었다.

1군에서 총파면고위수차와 코마는 수술 전에 비해 수술 후 1개월에 유의하게 증가(총파면고위수차: $p = 0.000$; 코마: $p = 0.000$, paired t -test)하였으며, 1개월에서 3개월 사이와 3개월에서 6개월 사이, 6개월에서 12개월 사이 등

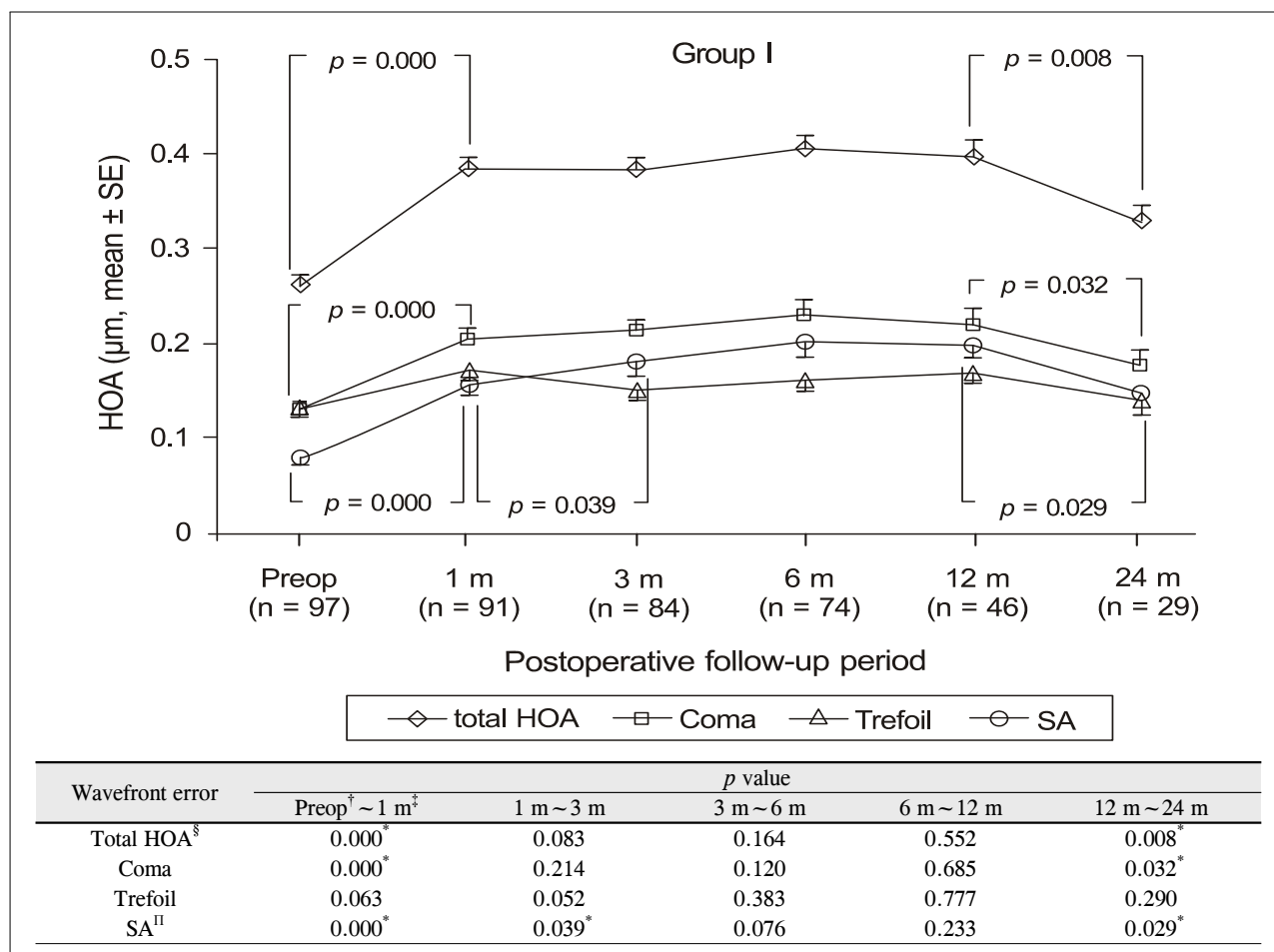


Figure 2. Time course of change in higher-order wavefront aberrations during postoperative 24 months after PRK in group I (myopic correction $\leq -4.37\text{D}$). Bars indicate standard error of the mean.

* $p < 0.05$, paired t -test; [†]Preop = preoperative; [‡]m = months; [§]HOA = higher-order wavefront aberration; ^{||}SA = spherical aberration.

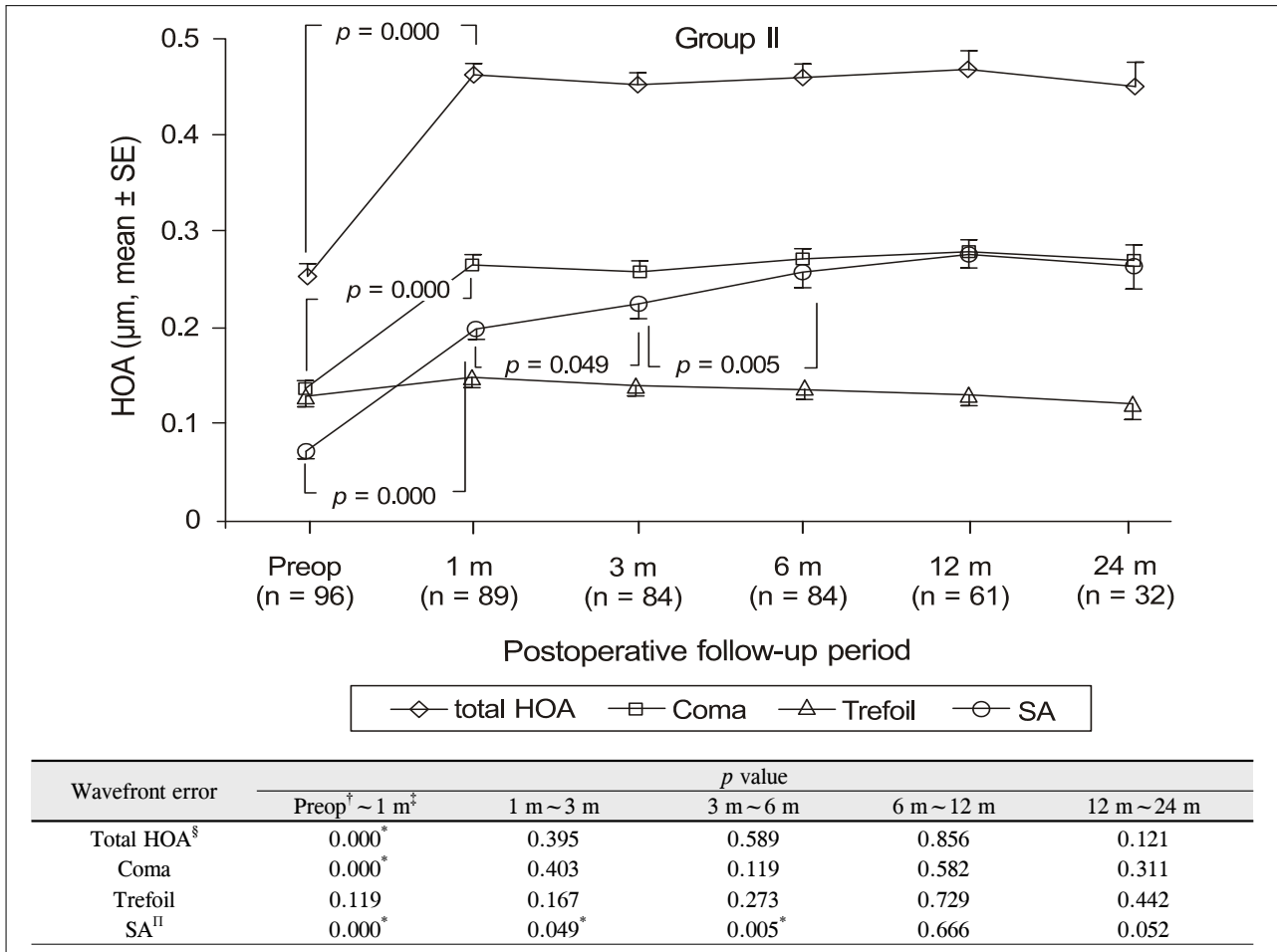


Figure 3. Time course of change in higher-order wavefront aberrations during postoperative 24 months after PRK in group II (myopic correction > -4.37D). Bars indicate standard error of the mean.

* $p < 0.05$, paired t -test; [†]Preop = preoperative; ^{*}m = months; [§]HOA = higher-order wavefront aberration; ^{||}SA = spherical aberration.

에서는 통계적 차이를 보이지 않았으며, 그리고 12개월에서 24개월 사이에서 다소간의 유의한 감소(총파면고위수차: $p = 0.008$; 코마: $p = 0.032$, paired t -test)를 나타내었다. 구면수차는 수술 전에서 수술 후 1개월 사이($p = 0.000$, paired t -test)와 1개월에서 3개월 사이($p = 0.039$, paired t -test)에서 유의한 증가를 보였으며, 3개월에서 6개월 사이와 6개월에서 12개월 사이에서는 통계적 차이를 보이지 않았으며, 그리고 12개월에서 24개월 사이에서 다소간의 유의한 감소($p = 0.029$, paired t -test)를 나타내었다. 세조각수차는 수술 전과 수술 후 1개월 사이의 비교뿐만 아니라 수술 후 각 경과관찰 시점 간의 비교에서도 통계적 차이를 보이지 않았다(Fig. 2).

2군에서 총파면고위수차와 코마는 수술 전에 비해 수술 후 1개월에 유의하게 증가(총파면고위수차: $p = 0.000$; 코마: $p = 0.000$, paired t -test)하였으며, 1개월에서 3개월 사이와 3개월에서 6개월 사이, 6개월에서 12개월 사이, 12개월과 24개월 사이 등에서 통계적 차이를 보이지 않았다.

구면수차는 수술 전에서 수술 후 1개월 사이($p = 0.000$, paired t -test)와 1개월에서 3개월 사이($p = 0.049$, paired t -test), 3개월에서 6개월 사이($p = 0.005$, paired t -test) 등에서 유의한 증가를 보였으며, 그리고 6개월에서 12개월 사이와 12개월에서 24개월 사이에서는 통계적 차이가 없었다. 세조각수차는 수술 전과 수술 후 1개월 사이의 비교뿐만 아니라 수술 후 각 경과관찰 시점 간의 비교에서도 통계적 차이를 보이지 않았다(Fig. 3).

수술 후 세 기간으로 나눈 고위수차의 변화량을 두 군 간에 비교하여 Table 3에 나타내었다. 총파면고위수차, 코마 및 구면수차는 단지 단기간에서만 2군에서 1군에 비해 통계적으로 유의하게 높은 증가(총파면고위수차: $p = 0.000$; 코마: $p = 0.014$; 구면수차: $p = 0.023$, independent t -test)를 보였고, 중기간과 장기간에서는 두 군 간에 차이가 없었다(Table 3).

Table 3. The amount of changes in all HOAs in terms of 3 time periods

Wavefront error	Group	Chang in RMS [†] and Zernike Coefficient (μm)		
		Short term (preop [‡] ~ postop [‡] 1 m [§])	Medium term (postop 1 ~ 6 m)	Long term (postop 6 ~ 24 m)
Total HOA [#]	Total	0.166 ± 0.148	0.003 ± 0.145	-0.062 ± 0.231
	I	0.125 ± 0.136	0.014 ± 0.134	-0.081 ± 0.162
	II	0.207 ± 0.150	-0.007 ± 0.154	-0.046 ± 0.277
	p-value	0.000 [*]	0.375	0.554
Coma	Total	0.099 ± 0.149	0.025 ± 0.148	-0.040 ± 0.196
	I	0.073 ± 0.131	0.042 ± 0.129	-0.056 ± 0.133
	II	0.127 ± 0.161	0.009 ± 0.162	-0.027 ± 0.238
	p-value	0.014 [*]	0.173	0.560
Trefoil	Total	0.031 ± 0.102	-0.016 ± 0.121	-0.026 ± 0.122
	I	0.039 ± 0.115	-0.012 ± 0.146	-0.038 ± 0.142
	II	0.022 ± 0.087	-0.020 ± 0.092	-0.015 ± 0.102
	p-value	0.265	0.687	0.482
Spherical aberration	Total	0.101 ± 0.146	0.056 ± 0.145	-0.053 ± 0.207
	I	0.076 ± 0.115	0.047 ± 0.122	-0.050 ± 0.131
	II	0.126 ± 0.169	0.064 ± 0.163	-0.055 ± 0.256
	p-value	0.023 [*]	0.457	0.923

Values are RMS for total HOA and Zernike coefficients for coma, trefoil, and spherical aberration (μm, mean ± SD).

* $p < 0.05$ (independent t -test) compared between group I and II; [‡]preop = preoperative; [‡]postop = postoperative; [§]m = months; [†]RMS = root mean square; [#]HOA = higher-order wavefront aberration.

고 찰

방사각막절개술, PRK 및 LASIK 등의 각막굴절수술 시 눈의 광학 수차는 수술 후에 증가된다고 알려져 있으며, 이러한 수술로 인한 수차의 증가는 주로 코마와 구면수차의 증가 때문으로 보고되었다.^{32,33} 그리고 수술 전 환자의 나이와 굴절이상 정도가 눈의 광학 수차에 영향을 미칠 수 있음이 밝혀져 있다.³⁴⁻³⁶ 따라서 본 연구에서는 대상 환자의 나이가 본 연구 결과에 영향을 미치지 않음을 우선적으로 확인하였다. 일반적으로 40세를 지나면서 고위수차가 유의하게 더 증가하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서는 40세 이하에 해당하는 환자가 98%로 대부분이어서 나이 분포가 다름으로 인한 영향이 최소화되었다. 또한 본 연구의 비교하고자 하는 두 군 간의 나이에 관한 통계적 차이(1군: 26.6 ± 5.8 세, 2군: 24.7 ± 5.2 세, $p \geq 0.05$, independent t -test)를 보이지 않아 본 연구의 계획 단계에서부터 나이 요소에 의한 영향은 충분히 배제되었다고 생각하였다. 그리고 Table 1에서 수술 전 성별과 난시값이 두 군간에 다소 차이를 보였는데 이것이 결과의 통계 분석에 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 그 중 성별은 전체적으로 남자(71명)에 비하여 여자(122명)가 많았으며, 특히 상대적으로 교정량이 적은 1군에서 여자가 더 많이 포함되어 있었다. 이러한 차이는 굴절교정수술의 특성상 여자 환자의 경우 낮은 도수에서도 안경을 벗고자 하는 미용적인 요구가 높아 발생하는 것으로 생각되었다. 이 점에 대하여는 저자들

이 종전에 수행한 연구²¹에서 수술 후 6개월에 성별에 따른 파면고위수차의 변화량에는 차이가 없었다고 밝힌 바 있다. 또한 난시값의 경우에는 저자들의 종전 연구²¹에서 난시값에 따른 수술 후 구면수차, 코마, 및 세조각수차의 변화량에 유의한 상관관계를 보이지 않았다는 근거에 따라 본 연구 분석에서 영향을 미치지 않았을 것으로 판단하였다. 그 이외에 수술 전 영향 인자 중 하나인 굴절 이상 정도가 본 연구의 주요 논점인데 그 동안의 연구들에서는 대체적으로 수술 전 굴절량이 클수록 고위수차의 발생이 증가한다고 보고된 바 있다.^{9,19-21,25-28} 그러나 본 연구에서처럼 많은 환자를 대상으로 수술 후 2년간에 달하는 장기간의 추적 분석 조사는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 수술자가 직접 지정하는 연마 중심을 이용한 ASA-PRK에서 수술 전 근시교정량이 수술 후 고위수차의 발생과 시간 경과에 따른 변화 추이에 미치는 영향에 대하여 알아보하고자 하였으며, 이를 통해 향후 환자 개개인의 파면고위수차까지 교정하는 맞춤형 각막굴절수술의 계획과 발전에 필요한 기초 자료를 제시해 보고자 하였다.

본 연구에 적용된 고위수차의 분석 방법을 설명하면, 동경 차수 4차를 넘는 아주 작은 값들은 임상적 가치가 낮은 것으로 판단하여 제외하였고 다른 여러 연구에서 흔히 채택되는 제니케 다항식의 동경 차수 3차와 4차에 해당하는 코마(coma, Z_{31}), 세조각수차(trefoil, Z_{33}) 및 구면수차(spherical aberration, Z_{40})로 한정되었다. 이러한 세 가지 개별 수차를 비교하는 데는 산출된 제니케 계수(Zernike

coefficients, μm)에서 위상차를 무시한 절대값과 그 값의 산술 평균을 이용하였다. 그 이유는 만약 각 환자에서 양과 음의 값으로 다양하게 나타난 제니케 계수를 각 군의 단순 산술 평균으로 계산하면 양과 음의 값이 상쇄되어 저평가 되는 오류를 범하여 각 군에서 일어난 고위수차의 특성이 제대로 반영되지 않을 것으로 판단하였기 때문이다. 또한 임상적 의미에서 볼 때도, 각 환자에서 발생한 고위수차에서 위상(phase)을 고려한 벡터량보다는 크기(magnitude) 그 자체가 해당 환자의 기능적 시력 불편과 더욱 관련이 높을 것으로 생각되며, 실제적으로 그 절대값을 산술 평균하여 두 군을 비교하면 그 해석이 더욱 명료할 것으로 생각되었다. 이러한 근거로 본 연구에서는 고위수차의 방향성을 고려한 분석을 포함하지 않았으며, 향후 코마와 세조각수차의 방향성과 크기를 모두 고려하는 보다 정교한 연구 디자인을 개발하고 그를 통한 분석이 있으면 더욱 큰 임상적 의의를 지닐 것으로 생각된다.

각막굴절수술 후에 발생하는 고위수차의 변화량에 관한 여러 연구들에서 PRK, LASEK 및 LASIK 모두 수술 후에 총파면고위수차, 코마 및 구면수차를 증가시킨다고 알려져 있다. 특히 수술 방법에 따라서는 PRK 후에는 1.18~5.25배,^{9,13,17,37} LASEK 후에는 1.00~2.44배,^{16,29,30} 그리고 LASIK 후에는 1.07~7.25배로 증가된다고 보고되었다.^{8,9,16,30,38,39} 또한 수술 후 고위수차의 증가는 대체적으로 PRK나 LASEK과 같은 표면연마술보다는 표층 수술인 LASIK 후에 더욱 심하며 이는 LASIK의 경우 절편 제작 자체로 인해 유도되는 고위수차의 발생이 상당한 것에 기인하는 것으로 보고되었다.⁴⁰ 본 연구에서는 수술 방법을 PRK로 국한함으로써 절편과 관련된 고위수차 발생 영향을 배제하고 오로지 각막 절제에 의한 영향만을 보다 정확하게 분석하는 특징을 가질 수 있었다. 그리고 엑시머 레이저의 연마 알고리즘(algorithm)과 관련하여 본 연구에서는 기존의 Munnerlyn 공식⁴¹의 거한 표준 방식이 적용되어 구면수차의 발생 가능성을 높이는 경향이 있었을 것으로 생각되며, 향후 비구면 파면고위수차 교정 방식이 적용되었을 경우 교정량 증가에 따라 구면수차 발생이 얼마나 줄어드는지 비교하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서 세 가지 고위수차의 수술 전 분포를 살펴보면, 코마가 0.134 μm 로 가장 많이 차지하였으며 그 다음으로 세조각수차가 0.129 μm 였고 구면수차는 0.078 μm 로 가장 적게 차지하여 Martinez et al²⁰의 연구와 일치하였다. 그리고 수술 후 6개월과 24개월에서의 수술 전 값에 비한 증가 정도를 살펴보면, 총파면고위수차는 169%와 153%가 증가하였고 각 개별 수차는 구면수차가 297%와 269%로 가장 많이 증가하였으며 그 다음으로 코마가 195%와

169%로 증가하였고 세조각수차는 114%와 101%로 미미한 증가를 보였다. 수술 후 증가에 관한 이러한 결과는 Lee and Chung,¹² Lee and Choi²¹ 및 Oshika et al²⁵의 연구와 일치하였다.

고위수차의 수술 후 변화를 요약하면, 1군과 2군별로 수술 후 1개월에 수술 전에 비해 유의하게 증가한 총파면고위수차, 코마 및 구면수차 값들은 수술 후 24개월까지 수술 전 값에 대비한 유의한 증가 상태가 유지되었다. 수술 후 증가된 이러한 고위수차 값들을 1군과 2군 간에 비교하였을 때 총파면고위수차, 코마 및 구면수차는 수술 후 1, 3, 6, 12 및 24개월의 각 경과관찰 시점에서 통계적으로 유의하게 2군이 1군에 비하여 더 높은 것으로 나타났다. 이에 따라 수술 후 두 군 모두에서 구면수차와 코마의 증가가 주도하는 총파면고위수차의 증가를 확인할 수 있었으며, 본 연구의 디자인에 의해 구분된 -4.37D를 초과하여 교정하는 경우에 그 이하를 교정하는 경우보다 수술 후에 더 많은 구면수차와 코마가 발생함을 알 수 있었다. 특히 수술로 인해 발생하는 고위수차의 증가는 수술 후 24개월까지 수술 전 값으로 회복되는 경향을 보이지 않고 계속 증가된 상태로 유지됨을 알 수 있었다. 본 연구와 같이 대상 환자를 근시 정도에 따라 군을 나누어 분석한 연구가 없는 실정으로서, 앞으로 더 많은 수술안을 대상으로 더 세밀하게 군을 나누어 분석한다면 근시 교정량이 얼마 이상에서 고위수차의 증가가 유의하게 달라지는지를 알아낼 수 있을 것이며 이를 통해 임상적으로 수술 전 유용한 예측 요소로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구의 193안 모두를 대상으로 근시교정량과 수술로 인해 유발된 고위수차 간의 상관관계를 수술 후 1, 3, 6, 12 및 24개월의 모든 경과관찰 시점에서 분석해 보았는데, 총파면고위수차, 코마 및 구면수차는 근시교정량이 증가할수록 수술로 인해 유발되는 고위수차 값이 증가하는 약한 양의 상관관계를 나타내었으며 이러한 우리의 연구 결과는 종전의 발표된 Martinez et al²⁰과 Schwiegerling and Snyder⁴²의 결과와 상응함을 알 수 있었다. 그리고 Halliday⁴³의 연구에 의하면 교정량이 증가할수록 그에 따른 환자의 주관적 증상인 눈부심, 상의 왜곡 및 흐려보임의 빈도가 증가하는 것으로 보고되어, 수술 후에도 각막의 우수한 광학적 특성을 유지시키려는 관점에서 볼 때는 교정량이 많은 각막굴절수술은 바람직하지 않을 수도 있다. 임상적으로 수술 후 질적 시력 저하를 초래하지 않는 고위수차의 수준이 아직 밝혀져 있지 않기 때문에 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각되며, 본 연구에서의 교정량에 따라 두 군으로 나눈 결과를 토대로 한다면 -4.37D를 초과하는 근시 교정에서는 수술 후 고위수차의 증가와 그에 따른 환자의 시 기

능에 영향을 미칠 가능성이 있음을 수술자는 인지하여야 할 것으로 생각된다. 또한, 교정량 증가에 따른 고위수차의 발생은 현 시점에서 조절할 수 없는 요소이지만, 수술 후 고위수차의 발생을 줄이기 위해서는 정확한 수술 전 굴절 검사, 엑시머 레이저 광선의 동질성 유지, 수술실 내의 온도와 습도 관리 및 정확한 중심잡기 등의 다각적인 노력도 중요할 것으로 판단된다. 한편, 세조각수차의 경우에는 수술 후 12개월 시점에서만 산포도에서 통계적 유의성을 보이는 매우 약한 음의 기울기를 다소 보였는데, 이에 대해서는 아직 문헌보고를 통해 밝혀진 바가 전혀 없어 향후 연구 과제로 생각되며 이의 규명을 통해 고위수차까지 교정하는 맞춤형 각막굴절수술의 알고리즘 개발에 중요한 지표를 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

수술 후 시간이 경과하면서 각 수차들이 어떻게 변화하는 지에 관한 추이를 보면, 코마가 수술 1개월 후에는 변화를 보이지 않고 비슷한 값이 유지됨에 비해 구면수차의 경우에는 시간 경과에 따라 다른 수차들에 비해 더 많은 변화를 보였다. 구면수차의 변화 추이에서 $-4.37D$ 이하를 교정하는 경우에는 수술 전에서 수술 후 1개월까지뿐만 아니라 1개월에서 3개월 사이에도 통계적으로 유의한 증가가 계속되고 있었으며, $-4.37D$ 를 초과하여 교정하는 경우에는 추가적으로 수술 후 3개월에서 6개월까지도 통계적으로 유의한 증가가 계속되고 있음을 관찰할 수 있었다. 구면수차의 경우 수술 후 계속 증가하는 기간이 다른 수차보다 길다는 우리의 결과는 Martinez et al²⁰의 연구 결과와 일치하였다. Oshika et al⁹은 각막굴절수술 1개월 후 고위수차가 유의하게 증가하였으며 그 증가가 12개월 동안 지속되고 있음을 강조하였고, 구면수차의 증가는 특히 LASIK 수술 후에 두드러진다고 보고하였다. 교정량에 따라서는 2군에서 모든 고위수차 값들이 24개월까지 통계적으로 유의한 감소를 보이지 않는 반면에 1군에서는 12개월에서 24개월 사이에 총 파면고위수차, 코마, 구면수차의 유의한 감소가 관찰되기 시작하였다. 이는 교정량이 적을 경우 수술 후 1년 정도 지나면 수술 전 값으로 회귀하려는 경향을 나타내는 것을 의미하는지 아니면 대상 환자의 수가 1년 경과관찰이 지나면서 감소하여 나타난 통계적 분석의 한계에 기인한 것인지를 본 연구의 자료로는 결론지을 수 없었으며 보고된 다른 연구에서도 관련 사항을 확인할 수 없었다. 향후 이에 대한 추가적인 연구가 중요할 것으로 판단되었다.

수술 후 세 기간으로 나눈 고위수차의 변화량을 두 군 간에 비교하였을 때 총파면고위수차, 코마 및 구면수차는 단지 단기간(수술 전에서 수술 후 1개월까지)에서만 2군에서 1군에 비해 통계적으로 유의하게 높은 증가를 보였고, 중기간과 장기간에서는 두 군 간에 차이가 없었다. 이러한 결과

는 ASA-PRK로 인해 발생하는 수술 후 고위수차의 증가는 오로지 수술 자체로 인해 각막의 표면에서 일어나는 변화에 기인하는 것으로 수술 후 오랜 시간이 경과하여 창상치유 과정에 의한 각막 표면의 불규칙성이 호전된다 하더라도 수술 자체로 인한 변화를 상쇄할 수는 없는 것으로 해석되었다. 즉, PRK에 의해 각막 중심부의 만곡도는 감소하게 되고 연마 가장자리 이행부의 만곡도는 상대적으로 증가하게 되며 이에 따라 이 부위 각막을 통해 들어오는 빛은 중심부로 들어온 빛보다 더 망막의 앞쪽에 상을 맺게 되어 궁극적으로 구면수차의 증가로 이어지게 된다. 특히 이와 같은 각막굴절수술 후 구면수차의 증가는 동공이 확장되는 경우에 더욱 두드러지게 나타나^{22,23} 환자의 주관적 시력 불편까지 초래하는 것으로 알려져 있다.^{14,15} 이러한 현상은 교정량이 많아질수록 각막 중심부를 더 깊게 연마하게 되고 그에 따라 각막 표면의 연마 부위와 이행 부위의 만곡도 변화가 더욱 심화되며 마지막에는 더 많은 고위수차의 증가로 이어지는 것으로 판단되었다. 그리고 PRK 수술에서는 각막 상피를 손상시키고 간질에 레이저를 조사하는 수술 방법의 특성상 각막간질세포에 의해 주도되는 창상치유 과정이 활발하게 일어나고 그로 인해 초래되는 각막 표면의 미세한 불규칙성²⁴도 고위수차의 지속된 증가에 일부 기여할 것으로 생각되었다.

파면고위수차를 교정하는 최신의 수술 방식에서도 성공적인 수술 결과를 얻기 위해서는 동공의 크기가 수차에 미치는 영향, 수술 방식이 조절력에 미치는 영향 및 파면 수차와 시력과의 관계 등 풀어야 할 과제가 여전히 많다. 본 연구에서도 제한점으로 경과관찰 기간이 24개월이라는 점, 24개월의 대상 환자 수가 부족하였다는 점 및 시력의 질과 관련된 평가가 포함되지 않았다는 점 등이 있었다. 본 연구를 통해 ASA-PRK 후 코마와 구면수차의 증가는 근시교정량과 약한 양의 상관관계를 보여준다는 것, $-4.37D$ 이하보다 초과하여 근시를 교정한 경우 수술 후에 더 많은 구면수차와 코마가 발생한다는 것, 또한 이러한 고위수차의 증가는 수술 후 24개월까지 계속 증가된 상태로 유지된다는 것 등을 알 수 있었다. 기존의 표준 연마 방식을 이용한 본 연구의 고위수차 관련 결과는 맞춤형 파면유도각막절제 방식을 개발하고 광학적 부작용을 최소화하는 데 유용한 기초를 제공할 것으로 기대된다. 향후 대조민감도, 눈부심, 흐려보임 및 변조전달함수(modulation transfer function) 등의 평가를 포함하는 연구를 통해 고위수차가 시력의 질적인 측면에 미치는 정확한 영향을 알아보는 것이 필요할 것이다. 또한 수술 후 증가된 고위수차로 인한 시력의 질적 저하에 영향을 미치지 않는 수술 전 근시교정량의 한계선을 알아보는 연구도 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) Trattler WB, Barnes SD. Current trends in advanced surface ablation. *Curr Opin Ophthalmol* 2008;19:330-4.
- 2) Randleman JB, Loft ES, Banning CS, et al. Outcomes of wavefront-optimized surface ablation. *Ophthalmology* 2007;114:983-8.
- 3) Ghadhfan F, Al-Rajhi A, Wagoner MD. Laser in situ keratomileusis versus surface ablation: visual outcomes and complications. *J Cataract Refract Surg* 2007;33:2041-8.
- 4) Stonecipher K, Ignacio TS, Stonecipher M. Advances in refractive surgery: microkeratome and femtosecond laser flap creation in relation to safety, efficacy, predictability, and biomechanical stability. *Curr Opin Ophthalmol* 2006;17:368-72.
- 5) Trokel SL, Srinivasan R, Braren B. Excimer laser surgery of the cornea. *Am J Ophthalmol* 1983;96:710-5.
- 6) Gartry DS, Kerr Muir MG, Marshall J. Excimer laser photorefractive keratectomy. 18-month follow-up. *Ophthalmology* 1992;99:1209-19.
- 7) Tengroth B, Epstein D, Fagerholm P, et al. Excimer laser photorefractive keratectomy for myopia. Clinical results in sighted eyes. *Ophthalmology* 1993;100:739-45.
- 8) Moreno-Barriuso E, Lloves JM, Marcos S, et al. Ocular aberrations before and after myopic corneal refractive surgery: LASIK-induced changes measured with laser ray tracing. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2001;42:1396-403.
- 9) 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.
- 10) Marshall J, Trokel SL, Rothery S, Krueger RR. Long-term healing of the central cornea after photorefractive keratectomy using an excimer laser. *Ophthalmology* 1988;95:1411-21.
- 11) Seiler T, Holschbach A, Derse M, et al. Complications of myopic photorefractive keratectomy with the excimer laser. *Ophthalmology* 1994;101:153-60.
- 12) Lee SB, Chung MS. Advanced Surface Ablation-Photorefractive Keratectomy (ASA-PRK): Safety and clinical outcome for the correction of mild to moderate myopia with a thin cornea. *J Korean Ophthalmol Soc* 2006;47:1274-86.
- 13) Oliver KM, Hemenger RP, Corbett MC, et al. Corneal optical aberrations induced by photorefractive keratectomy. *J Refract Surg* 1997;13:246-54.
- 14) Tanabe T, Miyata K, Samejima T, et al. Influence of wavefront aberration and corneal subepithelial haze on low-contrast visual acuity after photorefractive keratectomy. *Am J Ophthalmol* 2004;138:620-4.
- 15) Neeracher B, Senn P, Schipper I. Glare sensitivity and optical side effects 1 year after photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2004;30:1696-701.
- 16) Lee MJ, Lee SM, Lee HJ, et al. The changes of posterior corneal surface and high-order aberrations after refractive surgery in moderate myopia. *Korean J Ophthalmol* 2007;21:131-6.
- 17) Wigledowska-Promienska D, Zawojka I. Changes in higher order aberrations after wavefront-guided PRK for correction of low to moderate myopia and myopic astigmatism: two-year follow-up. *Eur J Ophthalmol* 2007;17:507-14.
- 18) Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, Seiler T. Increased higher-order optical aberrations after laser refractive surgery: a problem of subclinical decentration. *J Cataract Refract Surg* 2001;27:362-9.
- 19) Seiler T, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE. Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism. *Arch Ophthalmol* 2000;118:17-21.
- 20) Martinez CE, Applegate RA, Klyce SD, et al. Effect of pupillary dilation on corneal optical aberrations after photorefractive keratectomy. *Arch Ophthalmol* 1998;116:1053-62.
- 21) Lee SB, Choi BH. Analysis of higher-order wavefront aberrations in standard PRK. *J Korean Ophthalmol Soc* 2005;46:1454-63.
- 22) He JC, Burns SA, Marcos S. Monochromatic aberrations in the accommodated human eye. *Vision Res* 2000;40:41-8.
- 23) Wang Y, Zhao K, Jin Y, et al. Changes of higher order aberration with various pupil sizes in the myopic eye. *J Refract Surg* 2003;19:S270-4.
- 24) Miyamoto T, Saika S, Yamanaka A, et al. Wound healing in rabbit corneas after photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:153-8.
- 25) Oshika T, Miyata K, Tokunaga T, et al. Higher order wavefront aberrations of cornea and magnitude of refractive correction in laser in situ keratomileusis. *Ophthalmology* 2002;109:1154-8.
- 26) Buzzonetti L, Petrocelli G, Valente P, et al. Comparison of corneal aberration changes after laser in situ keratomileusis performed with mechanical microkeratome and IntraLase femtosecond laser: 1-year follow-up. *Cornea* 2008;27:174-9.
- 27) Steinert RF, Fynn-Thompson N. Relationship between preoperative aberrations and postoperative refractive error in enhancement of previous laser in situ keratomileusis with the LADARVision system. *J Cataract Refract Surg* 2008;34:1267-72.
- 28) Marcos S, Barbero S, Llorente L, Merayo-Llodes J. Optical response to LASIK surgery for myopia from total and corneal aberration measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2001;42:3349-56.
- 29) Seo KY, Lee JB, Kang JJ, et al. Comparison of higher-order aberrations after LASEK with a 6.0 mm ablation zone and a 6.5 mm ablation zone with blend zone. *J Cataract Refract Surg* 2004;30:653-7.
- 30) Oh SJ, Lee IS, Lee YG, et al. Comparison of higher-order aberrations between wavefront-guided laser in situ keratomileusis and laser epithelial keratomileusis. *J Korean Ophthalmol Soc* 2004;45:1652-8.
- 31) Lee SB, Hwang BS, Lee JY. Effects of decentration of photorefractive keratectomy on the induction of higher order wavefront aberrations. *J Refract Surg* 2009;1-13. doi: 10.3928/1081597X-20091209-01. [Epub ahead of print]
- 32) Marcos S. Aberrations and visual performance following standard laser vision correction. *J Refract Surg* 2001;17:S596-601.
- 33) Hjortdal JO, Olsen H, Ehlers N. Prospective randomized study of corneal aberrations 1 year after radial keratotomy or photorefractive keratectomy. *J Refract Surg* 2002;18:23-9.
- 34) Oshika T, Klyce SD, Applegate RA, Howland HC. Changes in corneal wavefront aberrations with aging. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1999;40:1351-5.
- 35) Cheng X, Bradley A, Hong X, Thibos LN. Relationship between refractive error and monochromatic aberrations of the eye. *Optom Vis Sci* 2003;80:43-9.
- 36) McLellan JS, Marcos S, Burns SA. Age-related changes in monochromatic wave aberrations of the human eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2001;42:1390-5.
- 37) Nagy ZZ, Palagyi-Deak I, Kelemen E, Kovacs A. Wavefront-guided photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism.

- J Refract Surg 2002;18:S615-9.
- 38) Yang SJ, Kim TI, Cha HW. Comparison of wavefront-guided LASIK and conventional LASIK. J Korean Ophthalmol Soc 2004;45:117-24.
- 39) Mrochen M, Kaemmerer M, Seiler T. Clinical results of wavefront-guided laser in situ keratomileusis 3 months after surgery. J Cataract Refract Surg 2001;27:201-7.
- 40) Pallikaris IG, Kymionis GD, Panagopoulou SI, et al. Induced optical aberrations following formation of a laser in situ keratomileusis flap. J Cataract Refract Surg 2002;28:1737-41.
- 41) Munnerlyn CR, Koons SJ, Marshall J. Photorefractive keratectomy: a technique for laser refractive surgery. J Cataract Refract Surg 1988;14:46-52.
- 42) Schwiegerling J, Snyder RW. Corneal ablation patterns to correct for spherical aberration in photorefractive keratectomy. J Cataract Refract Surg 2000;26:214-21.
- 43) Halliday BL. Refractive and visual results and patient satisfaction after excimer laser photorefractive keratectomy for myopia. Br J Ophthalmol 1995;79:881-7.

=ABSTRACT=

Effects of Amount of Myopic Correction on Long-term Changes in Higher-order Wavefront Aberrations in ASA-PRK

Jin-Seon Kim, MD, Sang-Bumm Lee, MD, PhD

Department of Ophthalmology, Yeungnam University College of Medicine, Daegu, Korea

Purpose: To evaluate the effects of the amount of myopic correction on long-term changes in higher-order wavefront aberrations (HOAs) in advanced surface ablation-photorefractive keratectomy (ASA-PRK).

Methods: The 193 eyes of 101 patients who underwent ASA-PRK were divided into two groups according to the amount of myopic correction by the median value (Group 1 ≤ -4.37 D, 97 eyes, mean -3.26 ± 0.77 D; Group 2 > -4.37 D, 96 eyes, mean -5.77 ± 1.00 D). Wavefront aberrometry was performed to measure total HOA, coma, trefoil, and spherical aberration preoperatively and at 1, 3, 6, 12, and 24 months after ASA-PRK. Statistical analysis was performed to compare changes in all HOAs between the two groups.

Results: Each magnitude of total HOA, coma, and spherical aberration except trefoil significantly increased at 1, 3, 6, 12, and 24 months postoperatively in each group ($p < 0.05$), and the increases were statistically significantly higher in group 2 compared to those of group 1 ($p < 0.05$). The amount of changes in all HOAs except trefoil revealed that statistically significantly higher increases in group 2 compared to those of group 1 were determined only in the short-term period (up to 1 month, $p < 0.05$), but not in the medium-term (1 to 6 months) or long-term periods (6 to 24 months).

Conclusions: Postoperative total HOA, coma, and spherical aberration significantly increased in both groups, and these increases in surgery-induced HOAs were significantly higher in group 2 (> -4.37 D). Increases in ASA-PRK-induced HOAs primarily originated from short-term changes in the postoperative one-month period and did not return to the preoperative level during the postoperative two-year period.

J Korean Ophthalmol Soc 2010;51(9):1184-1195

Key Words: ASA-PRK, Higher-order wavefront aberration, Long-term change, Myopic correction, PRK

Address reprint requests to **Sang-Bumm Lee, MD, PhD**

Department of Ophthalmology, Yeungnam University Medical Center

#317-1 Nam-gu, Daemyeong-dong, Daegu 705-717, Korea

Tel: 82-53-620-3445, Fax: 82-53-626-5936, E-mail: sbummlee@med.yu.ac.kr