

# Zywave<sup>®</sup> II 수차계로 측정한 굴절교정수술 대상안의 수술 전 안구수차 분석

김영승 · 고병이

건양대학교 의과대학 안과학교실

**목적:** Zywave<sup>®</sup> II 수차계로 측정한 굴절교정수술 대상안에서의 수술 전 안구 수차의 분포에 대해 분석하고자 하였다.

**대상과 방법:** 116명, 232안을 대상으로 Zywave<sup>®</sup> II aberrometer를 이용하여 안구수차를 측정하였다. 저위수차는 구면렌즈대응치로 산출하였고, 고위수차는 6 mm 동공 지름에서, 3차에서 5차까지 총고위수차, 각 차수의 합계된 고위수차, 코마수차( $Z_3^{-1}$  and  $Z_3^1$ ), 세조각수차( $Z_3^{-3}$  and  $Z_3^3$ ), 구면수차( $Z_4^0$ )의 root mean square (RMS) 값을 구하여 성별, 연령, 굴절오차(구면렌즈대응치)를 기준으로 비교하였고, 양안의 대칭성, 중심각막두께와의 관계를 분석하였다.

**결과:** 평균 구면렌즈대응치는  $-4.67 \pm 1.83$  D였으며, 총고위수차의 RMS값은  $0.421 \pm 0.201 \mu\text{m}$ 이고, 3차, 4차 및 5차항의 합계된 RMS값은 각각  $0.346 \pm 0.206 \mu\text{m}$ ,  $0.202 \pm 0.105 \mu\text{m}$ ,  $0.087 \pm 0.048 \mu\text{m}$ 이며, 코마수차, 세조각수차, 구면수차는 각각  $0.241 \pm 0.172 \mu\text{m}$ ,  $0.225 \pm 0.154 \mu\text{m}$ ,  $0.136 \pm 0.102 \mu\text{m}$ 였다. 성별과 연령과는 관련성이 없었고, 굴절오차와 고위수차는 일반적으로는 관련성이 없었으나, 세조각수차는 근시 정도와 강한 상관관계를 보였다( $r=-0.900$ ,  $p=0.008$ ). 양안의 차이는 없었으며, 중심각막두께와의 연관성도 보이지 않았다.

**결론:** Zywave<sup>®</sup> II 수차계로 측정한 한국인 근시안의 고위수차 분포에 대해 보고하며, 근시의 정도와 세조각수차는 상관관계가 있으며, 좌우안 대칭을 보였다.

〈대한안과학회지 2013;54(11):1680-1687〉

전통적인 각막굴절교정수술은 근시, 원시, 난시와 같은 굴절이상을 교정하여 시력개선 효과를 얻을 수 있었으나, 눈부심, 불빛 번짐, 야간 시력저하, 대비감도 저하 등의 불만을 초래하였다.<sup>1-4</sup> 이러한 시력의 질 저하 문제를 이해하기 위해서 필요한 것이 수차에 대한 개념으로 이는 평면파(plane wavefront)가 Snell's law에 따라 굴절될 때 기대되는 상과 실제로 존재하는 상과의 차이를 나타내며, 원거리에서 오는 평행 광선은 한 점에서 맺히는 것이 이상적이지만 눈으로 들어오는 빛은 완벽하게 한 점에서 모이지 못하기 때문에 발생한다.<sup>5,6</sup> 20세기에 광학수차를 Zernike 다항식을 통해 산술적으로 정량화하여 표현할 수 있게 되었고,<sup>7</sup> 안과적으로도 눈의 시각적 상태를 측정하여 객관적인 수치로 나타내는 수차계의 개발로 눈 내부의 빛의 굴절 경로를

분석하고 각 환자들에게서 구체적으로 나타나는 상태를 정밀하게 기록할 수 있게 되었다. 이로써 근시, 원시, 난시 등의 저위수차 뿐만 아니라 구면수차, 코마수차, 세조각수차 등의 고위수차를 측정하고 줄여줌으로써 굴절교정은 물론 시력의 질까지 개선하게 되었다. 따라서 사람의 눈을 대상으로 한 수차의 분포에 대한 기초 자료는 임상적으로 중요하다 하겠다.

지금까지 외국인을 대상으로 안구수차의 분포에 대한 연구들이 발표되었으나,<sup>8-11</sup> 민족에 따라 차이가 있다는 보고들이 있었다.<sup>12-16</sup> 한국인을 대상으로 한 연구를 보면, Chun et al<sup>17</sup>이 38명 63안을 대상으로 나이에 따른 수차변화를 비교하고, 62명 118안에서 굴절오차에 따른 수차변화를 보고하였고, Yum et al<sup>18</sup>이 27명 41안을 대상으로 서로 다른 수차계로 측정된 안구수차 값을 비교한 논문을 발표하였으나, 많은 수를 대상으로 한 안구수차의 정상 분포에 대한 보고는 아직까지 없었다. 이에 저자들은 한국인에서 많은 수의 굴절교정수술 대상자를 조사하여 수술 전 안구수차에 대한 자료를 보고하고, 다른 민족에 대한 연구 자료와 비교 분석하며, 성별, 연령, 굴절오차, 각막두께 등의 인자와 관련성 여부와, 각 개체 내에서 양안의 차이가 있는지를 분석하고자 하였다.

■ Received: 2013. 5. 31.      ■ Revised: 2013. 8. 13.

■ Accepted: 2013. 10. 17.

■ Address reprint requests to Byung Yi Ko, MD, PhD  
 Department of Ophthalmology, Konyang University Hospital,  
 #158 Gwanjeodong-ro, Seo-gu, Daejeon 302-718, Korea  
 Tel: 82-42-600-9258, Fax: 82-42-600-9176  
 E-mail: kopupil@hanmail.net

\* This study was presented as a poster at the 106th Annual Meeting of the Korean Ophthalmological Society 2011.

## 대상과 방법

2007년 10월부터 2011년 9월까지 본원 안과를 방문하여 각막굴절교정수술을 위한 수술 전 검사를 받은 한국인 116명 232안을 대상으로 의무기록을 후향적으로 조사하였다. 안과적 수술의 과거력이나 안구 외상, 각막 흉터, 백내장 또는 매체혼탁 등의 안구수차 측정에 영향을 줄 수 있는 질환을 가지고 있는 경우는 연구대상에서 제외하였고, 모두 최대교정시력이 1.0 이상이였다. 콘택트렌즈 착용자들은 소프트 콘택트렌즈는 1주, rigid gas-permeable (RGP) 렌즈는 3주 전에 사용을 중지할 것을 지시하였다.

현성굴절검사를 시행한 후 세극등현미경 검사 상 각결막 등 전안부의 병변이 없음을 확인하고, 안구수차 검사를 시행하였는데, 안구수차는 Hartmann-Shack 파면검출기 방식의 Zywave® II aberrometer (Technolas Perfect Vision GmbH, München, Germany)를 이용하였고, 산동은 시행하지 않은 채 암실에서 각 안마다 6 mm의 동공에서 3회씩 측정하였다. 동공 크기가 6 mm 이하인 경우는 모두 제외하였으며 2명의 숙련된 검사자가 무작위로 시행하였고 3회 측정시간은 총 15분을 넘기지 않았다. 저위수차는 측정된 Zywave phoropter predicted refraction (PPR) (3.5 mm)을 구면렌즈대응치로 환산하였고, 고위수차는 각 Zernike 상수의 실제수치와 절대값의 중앙값과 표준편차를 산출하여 분포를 알아보았는데, 실제수차는 normal band view 표에 기재된 수치를 인용하였다. 임상적인 유용성을 고려하여 3차에서 5차항까지의 총고위수차(total higher order aberration, HOA), 3차부터 5차까지 각 차수별로 합계된 고위수차, 3차인 코마수차(coma,  $Z_3^{-1}$  and  $Z_3^1$ )와 세조각수차(trefoil,  $Z_3^{-3}$  and  $Z_3^3$ ), 4차인 구면수차(spherical aberration, SA,  $Z_4^0$ )로 제한하여 RMS (root mean square) 값을 다음과 같은 공식에 따라 얻은 후 비교하였다.

총고위수차(Total higher order RMS) =

$$\sqrt{(RMS_3)^2 + (RMS_4)^2 + (RMS_5)^2}$$

3차 고위수차(RMS<sub>3</sub>) =

$$\sqrt{(Z_3^{-3})^2 + (Z_3^{-1})^2 + (Z_3^1)^2 + (Z_3^3)^2}$$

4차 고위수차(RMS<sub>4</sub>) =

$$\sqrt{(Z_4^{-4})^2 + (Z_4^{-2})^2 + (Z_4^0)^2 + (Z_4^2)^2 + (Z_4^4)^2}$$

5차 고위수차(RMS<sub>5</sub>) =

$$\sqrt{(Z_5^{-5})^2 + (Z_5^{-3})^2 + (Z_5^{-1})^2 + (Z_5^1)^2 + (Z_5^3)^2 + (Z_5^5)^2}$$

코마수차(Coma RMS) =  $\sqrt{(Z_3^{-1})^2 + (Z_3^1)^2}$

세조각수차(Trefoil RMS) =  $\sqrt{(Z_3^{-3})^2 + (Z_3^3)^2}$

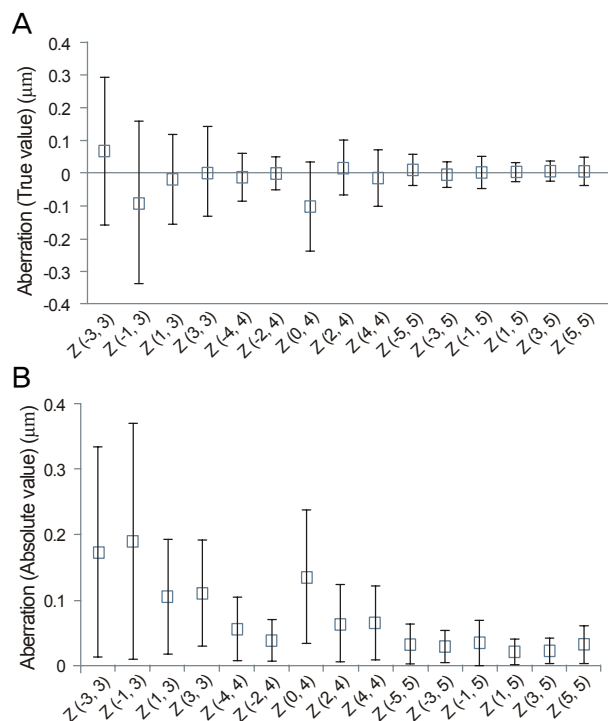
구면수차 (Spherical RMS) =  $\sqrt{(Z_4^0)^2}$

성별과 좌우안의 고위수차 값을 비교하기 위해 대응표본 *t*-검정을 이용하였고, 고위수차와 나이, 구면렌즈대응치 및 중심각막두께와의 관련성을 알아보기 위해서 Pearson 상관분석을 시행하였다.

통계분석은 SPSS Windows version 19.0 (SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였으며, *p*-value가 0.05 미만인 경우를 통계적으로 유의한 것으로 간주하였다.

## 결 과

총 116명의 232안이 본 연구에 포함되었고, 남자는 35명, 여자는 81명이었으며, 평균 연령은 25.2 ± 4.6세(20-38세)였다. 저위수차의 평균 구면렌즈대응치는 -4.67 ± 1.83세였다. 고위수차 Zernike 상수의 실제 수치와 절대값의 평균치 분포는 Fig. 1과 Table 1에 제시하였다. 실제 수치 중에서는 수직세조각수차( $Z_3^{-3}$ )가 가장 큰 양의 값을 보이며, 수직코마수차( $Z_3^{-1}$ )와 구면수차( $Z_4^0$ )는 가장 큰 음의 값을 보였고,  $Z_3^3$ ,  $Z_4^{-2}$ ,  $Z_5^{-3}$ ,  $Z_5^{-1}$ ,  $Z_5^1$ 의 다섯 가지 상수는 영(zero)과 통계적으로 차이 나지 않는 값을 보였다 (*p*>0.05, Paired *t*-test). 절대값 중에서는 3차인 세조각수차( $Z_3^{-3}$  and  $Z_3^3$ ), 코마수차( $Z_3^{-1}$  and  $Z_3^1$ )와 4차인 구면



**Figure 1.** (A) Error bar showing inter-subject averages and standard deviations for all higher order true Zernike coefficients (6-mm pupils). (B) Error bar showing inter-subject averages and standard deviations of all absolute values for higher order Zernike coefficients (6-mm pupil).

수차( $Z_4^0$ )값이 가장 컸다.

총고위수차의 RMS값은  $0.421 \pm 0.201 \mu\text{m}$ 이고, 3차, 4차 및 5차 고위수차의 합계된 RMS값은 각각  $0.346 \pm 0.206 \mu\text{m}$ ,  $0.202 \pm 0.105 \mu\text{m}$ ,  $0.087 \pm 0.048 \mu\text{m}$ 로서, 3차항이 가장 큰 비중을 차지하였으며, 다음으로 4차항, 5차항의 순서였고, 그 비율은 1:0.58:0.25였다. 코마수차, 세조각수차, 구면수차는 각각  $0.241 \pm 0.172 \mu\text{m}$ ,  $0.225 \pm 0.154 \mu\text{m}$ ,  $0.136 \pm 0.102 \mu\text{m}$ 로서, 이러한 세 가지 수차군이 전체 고위수차 중에서 가장 비중이 컸다(Fig. 2, Table 2).

성별에 따라 총고위수차, 3차, 4차 및 5차 고위수차의 합계된 RMS값, 코마수차, 세조각수차, 구면수차를 비교하였을 때, 통계학적으로 유의한 차이가 없었다(all  $p>0.05$ , Paired  $t$ -test). 연령과 고위수차의 상관관계를 분석하였을 때, 총고위수차와 3차의 합계된 고위수차 이외는 의미있

는 관계를 보이지 않았다(Fig. 3, Fig. 4, Table 3). 구면렌즈대응치와의 상관 분석에서는 3차인 세조각수차가 근시정도가 클수록 높은 수치를 보였다( $r=-0.900$ ,  $p=0.008$ , Pearson correlation analysis, Fig. 5, Table 4).

고위수차의 각 항목을 양안간 비교하였을 때 의미있는 차이를 보이지 않아서 양안의 대칭성을 확인할 수 있었다(all  $p>0.05$ , Paired  $t$ -test). 고위수차와 중심각막두께와는 상관관계를 보이지 않았다(all  $p>0.05$ , Pearson correlation analysis).

## 고 찰

근래 환자의 고위수차를 교정하여 시력의 질을 향상시키는 목적으로 웨이브프론트라식이 시행되고 있고, 백내장

**Table 1.** Signed and absolute values of the Zernike coefficients in the study population

Zernike Coefficient*	Mean $\pm$ SD ( $\mu\text{m}$ )		Range ( $\mu\text{m}$ )	
	Signed value	Absolute value	Minimum	Maximum
3rd order				
Z(-3,3)	$0.067 \pm 0.23$	$0.172 \pm 0.16$	-1.09	0.81
Z(-1,3)	$-0.089 \pm 0.25$	$0.190 \pm 0.18$	-1.29	0.55
Z(1,3)	$-0.019 \pm 0.14$	$0.105 \pm 0.09$	-0.41	0.41
Z(3,3)	$0.005 \pm 0.14$	$0.110 \pm 0.08$	-0.35	0.32
4th order				
Z(-4,4)	$-0.012 \pm 0.17$	$0.056 \pm 0.05$	-0.37	0.21
Z(-2,4)	$-0.001 \pm 0.05$	$0.038 \pm 0.03$	-0.13	0.12
Z(0,4)	$-0.101 \pm 0.14$	$0.136 \pm 0.10$	-0.53	0.23
Z(2,4)	$0.019 \pm 0.08$	$0.064 \pm 0.06$	-0.17	0.38
Z(4,4)	$-0.014 \pm 0.09$	$0.065 \pm 0.06$	-0.39	0.32
5th order				
Z(-5,5)	$0.010 \pm 0.05$	$0.032 \pm 0.04$	-0.14	0.32
Z(-3,5)	$-0.004 \pm 0.04$	$0.030 \pm 0.02$	-0.13	0.1
Z(-1,5)	$0.004 \pm 0.04$	$0.035 \pm 0.03$	-0.3	0.17
Z(1,5)	$0.004 \pm 0.03$	$0.022 \pm 0.02$	-0.08	0.08
Z(3,5)	$0.007 \pm 0.03$	$0.023 \pm 0.02$	-0.07	0.11
Z(5,5)	$0.006 \pm 0.04$	$0.032 \pm 0.03$	-0.22	0.14

\*Radial order and specific mode.

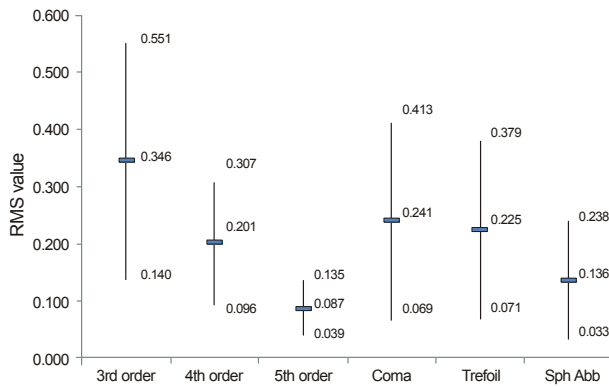
**Table 2.** Ocular aberrations of the subjects

Ocular aberrations	Results
Spherical equivalent (D)	$-4.67 \pm 1.83$
Sphere (D)	$-4.19 \pm 1.81$
Cylinder (D)	$-0.96 \pm 0.70$
Total higher order aberration ( $\mu\text{m}$ )	$0.421 \pm 0.201$
3rd order ( $\mu\text{m}$ )	$0.346 \pm 0.206$
4th order ( $\mu\text{m}$ )	$0.202 \pm 0.105$
5th order ( $\mu\text{m}$ )	$0.087 \pm 0.048$
Coma ( $\mu\text{m}$ )	$0.241 \pm 0.172$
Trefoil ( $\mu\text{m}$ )	$0.225 \pm 0.154$
Spherical aberration ( $\mu\text{m}$ )	$0.136 \pm 0.102$

Values are presented as mean  $\pm$  SD unless otherwise; Root mean square value ( $\mu\text{m}$ ) of aberration from 3rd to 5th order in the central 6-mm area was calculated.

수술에서도 각막의 구면수차를 보정하는 비구면인공수정체가 개발되어 사용되고 있다. 따라서 사람의 눈에서 측정된 수차의 분포에 대한 기초 자료는 임상적으로 중요한 의미를 갖는다.

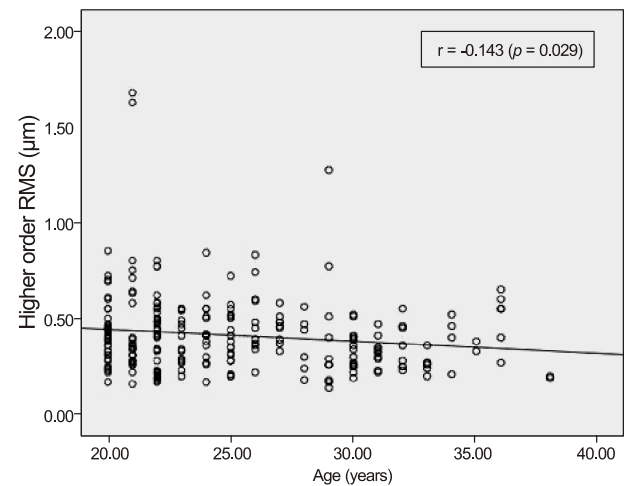
수차는 측정 원리가 다른 수차계 간에 측정치가 차이가 있다는 보고가 있으나,<sup>18-20</sup> 동일한 수차계로 반복하여 측정하면 대체로 재현성이 높다고 한다.<sup>18,19,21,22</sup> 이러한 수차의 분포에 대해 많은 보고가 있었는데, 대체로 고위수차는 민족에 따라 다른 분포를 보인다고 알려졌다.<sup>12-16</sup> 이에 저자들은 본 연구에서 한국인을 대상으로 하여 안구수차의 정상분포에 대한 기초 자료를 제시하고, 동일한 수차 측정방식인 Shack-Hartmann 수차계를 이용한 다른 민족들에 대한 연구 자료와 비교 분석하는 것을 목적으로 하였다 (Table 5).



**Figure 2.** Graph of summated RMS value (horizontal line)  $\pm$  1 standard deviation (ends of vertical lines) for 3rd- to 5th-order aberrations (RMS = root mean square; Sph Abb = spherical aberration).

대규모 인구를 대상으로 하는 Zernike 다항식 자료는 정규분포를 따른다고 알려져 있으므로, 정규분포를 기반으로 하는 통계적인 분석을 시행할 수 있다.<sup>23,24</sup> Salmon and van de Pol<sup>11</sup>이 발표한 논문은 지금까지 발표된 고위수차의 정상분포에 대한 가장 방대한 자료로서, 미국에서 8개, 일본과 스페인에서 각각 1개씩 전체 10개의 병원에서 모은 자료를 바탕으로 2,560안을 분석하였으나, 여러 민족이 섞여 있고, 비록 Shack-Hartmann 방식의 수차계를 사용하였지만 여러 다른 제조사의 수차계의 자료가 함께 있다는 한계가 있었다.

따라서 본 논문에서는 비교적 최근에 시행된 대규모의 연구 중에서 아시아계를 대상으로 한 연구와 서양인을 대상으로 한 연구들을 참고하여 저자들이 한국인을 대상으로



**Figure 3.** Scattergrams of total higher order aberration (third to fifth order) as a function of age; RMS = root mean square.

**Table 3.** Correlation between age and higher order aberrations

Ocular aberrations	Pearson correlation coefficient	p-value*
Total higher order aberration (μm)	-0.143	0.029
3rd order (μm)	-0.156	0.017
4th order (μm)	-0.105	0.111
5th order (μm)	0.001	0.991
Coma (μm)	-0.067	0.363
Trefoil (μm)	-0.129	0.050
Spherical aberration (μm)	-0.067	0.308

**Table 4.** Correlation between spherical equivalent and higher order aberrations

Ocular aberrations	Pearson correlation coefficient	p-value*
Total higher order aberration (μm)	-0.860	0.191
3rd order (μm)	-0.90	0.914
4th order (μm)	-0.69	0.637
5th order (μm)	-0.007	0.061
Coma (μm)	-0.210	0.096
Trefoil (μm)	-0.900	0.008
Spherical aberration (μm)	-0.820	0.211

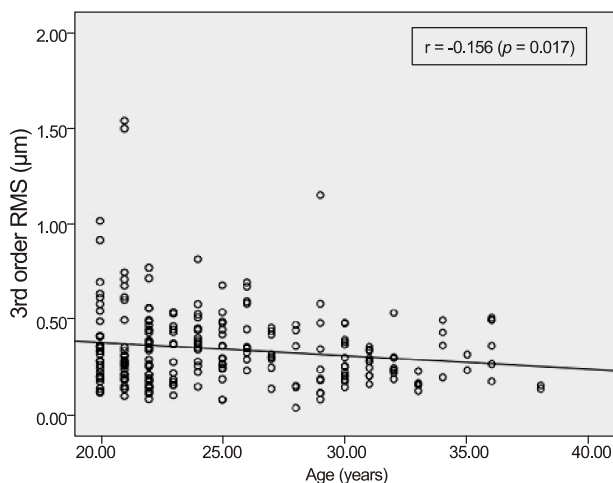
**Table 5.** Comparison of HOAs in present patient population with those in other studies

Parameter	Current Study (Korea)	Prakash et al <sup>12</sup> (India)	Wei et al <sup>13</sup> (Singapore)	Salmon and Van de Pol <sup>11</sup> (USA)*
Sample size	232	412	166	2,560
Ethnicity	Korean	Indian	Chinese	Mixed
Aberrometric principle and instrument used	Hartmann Shack, Zywave II	Hartmann Shack, Zywave	Hartmann Shack, Zywave	Hartmann-Shack,multiple aberrometers
HOA RMS	0.421 ± 0.20	0.36 ± 0.266	0.49 ± 0.16	0.33 ± 0.13
Summated RMS of 3rd to 5th order (μm)				
3rd order <sup>†</sup>	0.346 ± 0.206	0.23 ± 0.15	0.37 ± 0.16	0.25 ± 0.12
4th order <sup>†</sup>	0.202 ± 0.105	0.17 ± 0.09	0.29 ± 0.11	0.169 ± 0.09
5th order <sup>†</sup>	0.087 ± 0.048	0.08 ± 0.38	0.08 ± 0.04	0.067 ± 0.03
Ratio of means of 3rd:4th:5th order	1:0.58:0.25	1:0.7:0.3	1:0.78:0.002	1:0.68:0.3
Difference (%) of 3rd-5th order means; Korean versus other populations <sup>‡</sup>				
3rd order <sup>†</sup>		33.5	-6.9	27.7
4th order <sup>†</sup>		15.8	-43.5	16.3
5th order <sup>†</sup>		8.0	8.0	22.9
Major HOAs				
Coma <sup>†</sup>	0.241 ± 0.17	0.14 ± 0.10	0.27 ± 0.14	NS
Trefoil <sup>†</sup>	0.225 ± 0.154	0.16 ± 0.12	NS	NS
Spherical aberration <sup>†</sup>	0.136 ± 0.102	0.03 ± 0.05	0.22 ± 0.14	0.13 ± 0.09

Values are presented as mean ± SD.

HOA = higher-order aberration; NS = not specified in the published study; RMS = root mean square.

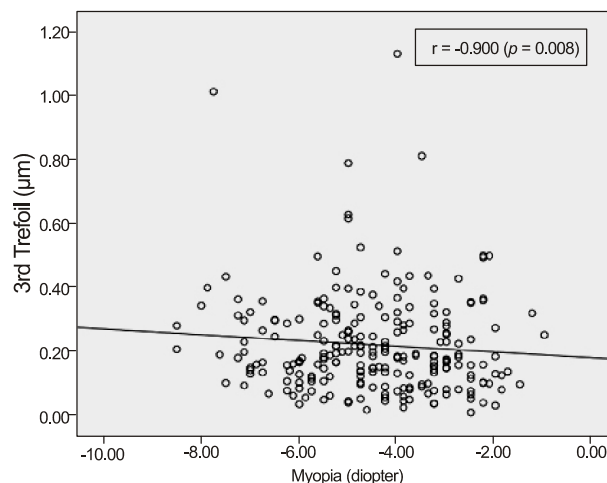
\*Pooled data of 10 centers (8 in U.S., 1 each in Spain and Japan); <sup>†</sup>Zernike order values, mean ± SD of RMS summation of individual modes of the respective orders; <sup>‡</sup>Calculated as  $\{[(\text{Mean}_{\text{Korean}} - \text{Mean}_{\text{Other}}) \times 100] / \text{Mean}_{\text{Korean}}\}$ .



**Figure 4.** Scattergram of 3rd order RMS as a function of age; RMS = root mean square.

시행한 검사 결과를 비교 분석하고자 하였다.

본 연구에서 총고위수차는  $0.421 \pm 0.201 \mu\text{m}$ 로 측정되었고, Wei et al<sup>13</sup>이 중국인을 대상으로 보고한  $0.49 \pm 0.16 \mu\text{m}$ 이나, 말레이시아인을 대상으로 Lim and Fam<sup>15</sup>이 보고한  $0.554 \pm 0.428 \mu\text{m}$ 과는 유사한 결과이나, Prakash et al<sup>12</sup>이 인도인을 대상으로 하여 발표한  $0.36 \pm 0.266 \mu\text{m}$ 이나, Wang and Koch<sup>8</sup>가 백인(60%)과 라틴아메리카계(20%)가 대상자의 다수를 차지한 연구에서 보고한  $0.305$



**Figure 5.** Scattergram of 3rd trefoil as a function of spherical refractive error; RMS = root mean square.

$\pm 0.095 \mu\text{m}$ 와는 차이를 보여, 아시아계와 서양인에서 다른 고위수차 분포를 보임을 확인할 수 있었다. 국내에서 보고된 Chun et al<sup>17</sup>의 연구에서는 각 연령군의 총고위수차의 평균은  $0.203 \mu\text{m}$ 으로 본 연구뿐 아니라 기타 아시아계 인종을 대상으로 한 타 연구와도 차이점을 보이고 있는데, 이는 대상 환자군의 동공 분석 직경이 5 mm로 본 연구에 비해 작았고, 분석에 사용된 기기도 Zywave가 아닌 Wavefront Aberration Supported Corneal Ablation (WASCA) 수차계

로 달라서 이러한 차이점을 나타내는 것으로 보인다.

3차의 합계된 고위수차 RMS값, 3차인 코마수차( $Z_3^{-1}$  and  $Z_3^1$ )와 4차인 구면수차( $Z_4^0$ )는 중국인을 대상으로 하여 Wei et al<sup>13</sup>이 보고한 수치에 가까운 결과를 보여, Prakash et al<sup>12</sup>이 언급한 아시아계 민족의 특징에 합당한 소견을 보였다. 아시아계 민족에서 고위수차가 높게 나오는 이유로서 인종적인 특성과 더불어 고위수차를 증가시키는 주된 인자 중의 하나인 각막표면의 눈물막 안정성이 아시아계의 눈에서 더 저하되어 있다는 점을 들 수 있겠다.<sup>13</sup>

3차, 4차, 5차의 각 차수 별로 합계된 고위수차 RMS값은 각각  $0.346 \pm 0.206 \mu\text{m}$ ,  $0.202 \pm 0.105 \mu\text{m}$ ,  $0.125 \pm 0.595 \mu\text{m}$ 로서 3차가 가장 높았고, 4차, 5차의 순서로 낮아졌으며, 다른 대규모 연구들에서의 보고와 동일한 경향이었으나,<sup>11-13</sup> 각 차수의 비율은 1:0.58:0.25로서 Prakash et al<sup>12</sup>이 언급한 아시아계의 특징과는 달리 4차항의 비율이 상대적으로 낮고, 5차항의 비율이 높은 소견을 보였는데, 이는 4차항에서 중요한 구면수차가 나이가 들면서 증가한다는 점과 본 연구의 평균 연령( $25.2 \pm 4.6$ 세)이 중국인을 대상으로 한 Wei et al<sup>13</sup>의 논문의 평균 연령( $32.1 \pm 6.2$ 세)보다는 7년 정도 어리고, 백인의 특징과 비슷한 인도인을 대상으로 한 Prakash et al<sup>12</sup>의 연구에서의 평균 연령( $23.63 \pm 1.99$ 세)과는 비슷한 점을 고려한다면 다른 아시아계와 구별되는 한국인의 고유한 특징이라기 보다는 나이에 의한 영향이 반영된 결과로 생각한다.

Reilly and Blair<sup>25</sup>가 보고한 바에 의하면, 총고위수차는 성별에 따른 차이를 보이지 않으나, Zernike 상수 중  $Z_{14}$  (tetrafoil,  $Z_4^4$ )와  $Z_{16}$  (secondary trefoil,  $Z_5^{-3}$ )에서 성별에 따른 차이를 보였다고 하였으나, 임상적인 의미나 설명을 제시하지는 못하였다. 본 연구에서는 모든 고위수차 항목에서 성별에 따른 차이를 발견할 수 없었고(all  $p > 0.05$ , Paired  $t$ -test), 다른 논문에서도 성별 차이를 주장하는 근거는 찾을 수 없었다.

연령에 따른 고위수차의 변화에 관해서는 다른 의견이 존재하는데, Kuroda et al<sup>26</sup>은 총고위수차가 나이에 따라 증가한다고 하였고, Berrio et al<sup>27</sup>은 총고위수차와 각막수차, 구면수차( $Z_4^0$ )와 수평코마수차( $Z_3^1$ )가 연령에 따른 증가를 보인다고 하였으나, Amano et al<sup>28</sup>은 나이와 각막의 구면수차와는 무관하다고 하였고, 나이가 들면서 안구의 구면수차가 증가하는 것은 수정체의 변화에 의한 것으로 설명하였다. 본 연구에서는 비록 상관계수는 낮지만, 총고위수차와 3차항의 합계된 고위수차가 나이가 들수록 오히려 감소하는 역의 상관관계가 있다고 나왔는데(각각  $r = -0.143$ ,  $p = 0.029$  and  $r = -0.156$ ,  $p = 0.017$ , Pearson correlation analysis), 이는 본 연구의 대상인 각막굴절교정수술을 받

으려 내원한 환자들의 연령 분포가 20대 초반이 다수이므로(20대는 180명, 30대는 52명) 나이의 변화를 충분히 반영하지 못하기 때문으로 생각한다.

굴절오차와 고위수차의 관계를 보면 Cheng et al<sup>29</sup>은 근시가 심할수록 구면수차가 증가한다고 하였으나, Wei et al<sup>13</sup>은 근시의 정도와 총고위수차, 3차, 4차, 5차의 합계된 고위수차, 구면수차가 관련이 없다고 하였고, 국내에서도 Chun et al<sup>17</sup>이 구면렌즈대응치가 증가해도 코마수차와 구면수차는 유의한 변화를 보이지 않았다 하고, Lee et al<sup>30</sup>도 구면렌즈대응치와 총고위수차 사이에 유의한 상관관계가 없다고 하였다. 본 연구에서도 근시의 정도와 총고위수차, 3차, 4차, 5차의 합계된 고위수차, 구면수차가 관련이 없었으나, Wei et al<sup>13</sup>이 근시와 수평세조각수차(horizontal trefoil,  $Z_3^3$ )이 경도의 유의한 관련성( $r = -0.158$ ,  $p = 0.017$ )이 있음을 밝힌 것과 유사하게, 3차인 세조각수차( $Z_3^{-3}$  and  $Z_3^3$ )가 근시와 상당한 유의한 관계( $r = -0.900$ ,  $p = 0.008$ )가 있었는데, 향후 이에 대한 임상적 의미에 대한 연구가 필요하리라 생각한다.

동일 개체에서 좌안과 우안의 고위수차에 어느 정도의 대칭성이 존재한다는 보고들이 있었는데,<sup>8-10</sup> 본 연구에서도 분석했던 모든 고위수차 항목에서 좌안과 우안에 통계적으로 차이가 없다는 결과(all  $p > 0.05$ , Paired  $t$ -test)가 나와서 이전의 보고와 동일한 결론을 내릴 수 있었다.

Mohamed et al<sup>31</sup>이 각막의 중심두께 및 주변부 두께와 각막 수차 및 안구 고위수차와는 관련성이 없었다고 하였는데, 본 연구에서도 각막 중심두께와 안구수차의 관련성을 분석하였고 이전 연구와 동일한 결과를 얻었다(all  $p > 0.05$ , Pearson correlation analysis).

본 연구의 장점은 한국인을 대상으로 많은 수의 정상 성인의 고위수차를 조사하여 기초자료를 제공하고, 고위수차와 관련될 수 있는 여러 인자들의 관련성에 대한 분석을 시행하였다는 점에 있다.

본 연구의 한계점은 젊은 근시 굴절교정수술 대상자만을 조사하였으므로 정시나 원시를 가진 정상인이 대상자에 포함되지 않았고 10대 이하의 젊은 연령과 40대 이상의 연령층이 없다는 점과, 양안의 자료를 모두 분석에 포함하였으므로 양안의 대칭성으로 인해 Zernike상수가 과장되게 반영되었을 가능성이 있다는 점이다.

결론적으로 한국인의 고위수차는 아시아계를 대상으로 한 다른 연구들과 유사한 분포를 보이며, 본 연구의 제한점을 보완하기 위하여 다양한 대상자 군을 포함하는 후속 연구가 필요할 것이다.

## REFERENCES

- 1) Chalita MR, Chavala S, Xu M, Krueger RR. Wavefront analysis in post-LASIK eyes and its correlation with visual symptoms, refraction, and topography. *Ophthalmology* 2004;111:447-53.
- 2) Yamane N, Miyata K, Samejima T, et al. Ocular higher-order aberrations and contrast sensitivity after conventional laser in situ keratomileusis. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2004;45:3986-90.
- 3) 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.
- 4) Kim TW, Wee WR, Lee JH, Kim MK. The changes of contrast sensitivity and glare in laser keratomileusis and laser epithelial keratomileusis with VISX S4. *J Cataract Refract Surg* 2007;23:355-61.
- 5) Lee SW, Choi TH, Lee HB. Comparison of wavefront guided customized ablation vs. conventional ablation. *J Korean Ophthalmol Soc* 2003;44:2607-14.
- 6) Oh SJ, Lee IS, Lee YG, et al. Comparison of higher-order aberrations (HOAs) between wavefront-guided laser in situ keratomileusis and laser epithelial keratomileusis. *J Korean Ophthalmol Soc* 2004;45:1652-8.
- 7) Born M, Wolf E. Principles of optics. 7th ed. New York, NY: Cambridge University Press, 1999:523-6.
- 8) Wang L, Koch DD. Ocular higher-order aberrations in individuals screened for refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:1896-903.
- 9) Porter J, Guirao A, Cox IG, Williams DR. Monochromatic aberrations of human eye in a large population. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 2001;18:1793-803.
- 10) Castejón-Mochón JF, López-Gil N, Benito A, Artal P. Ocular wave-front aberrations statistics in a normal young population. *Vision Res* 2002;42:1611-7.
- 11) Salmon TO, van de Pol C. Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:2064-74.
- 12) Prakash G, Sharma N, Choudhary V, Titiyal JS. Higher-order aberrations In young refractive surgery candidates in India; establishment of normal values and comparison with white and Chinese Asian populations. *J Cataract Refract Surg* 2008; 34:1306-11.
- 13) Wei RH, Lim L, Chan WK, Tan DT. Higher order ocular aberrations in eyes with myopia in a Chinese population. *J Refract Surg* 2006;22:695-702.
- 14) Cantú R, Rosales MA, Tepichin E, et al. Whole eye wavefront aberrations in Mexican male subjects. *J Refract Surg* 2004;20:685-8.
- 15) Lim KL, Fam HB. Ethnic differences in high-order aberrations: spherical aberration in the South East Asian Chinese eye. *J Cataract Refract Surg* 2009;35:2144-8.
- 16) Cerviño A, Hosking SL, Ferrer-Blaso T, et al. A pilot study on the differences in wavefront aberrations between two ethnic groups of young generally myopic subjects. *Ophthal Physiol Opt* 2008;28:532-7.
- 17) Chun DH, Choi TH, Lee HB. Age and spherical equivalent related changes in wavefront aberrations. *J Korean Ophthalmol Soc* 2004;45:266-72.
- 18) Yum JH, Choi SK, Kim JH, Lee DH. Comparison of aberrations in Korean normal eyes measured with two different aberrometers. *J Korean Ophthalmol Soc* 2009;50:1789-94.
- 19) Durrie DS, Stahl ED. Comparing wavefront devices. In: Kruger RR, Applegate RA, MacRae SM, eds. *Wavefront Customized Visual Corrections: The Quest for Super Vision II*. Thorofare, NJ: SLACK Inc; 2004; v. 1. chap. 21.
- 20) Jeong JH, Kim MJ, Tchah HW. Clinical comparison of laser ray tracing aberrometer and Shack-Hartmann aberrometer. *J Korean Ophthalmol Soc* 2006;47:1911-9.
- 21) Mirshahi A, Bühren J, Gerhardt D, Kohnen T. In vivo and in vitro repeatability of Hartmann-Shack aberrometry. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:2295-301.
- 22) Hament WJ, Nabar VA, Nuijts RM. Repeatability and validity of Zywave aberrometer measurements. *J Cataract Refract Surg* 2002;28:2135-41.
- 23) Thibos LN, Hong X, Bradley A, Cheng X. Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 2002;19:2329-48.
- 24) Thibos LN, Bradley A, Hong X. A statistical model of the aberration structure of normal, well-corrected eyes. *Ophthalmic Physiol Opt* 2002;22:427-33.
- 25) Reilly CD, Blair MA. Gender and wavefront higher order aberrations: Do the genders see the world differently? *Nepal J Ophthalmol* 2009;1:85-9.
- 26) Kuroda T, Fujikado T, Nonomiya S, et al. Effect of aging on ocular light scatter and higher order aberrations. *J Refract Surg* 2002;18:S598-602.
- 27) Berrio E, Tabernero J, Artal P. Optical aberrations and alignment of the eye with age. *J Vis* 2010;10. pii: 34.
- 28) Amano S, Amano Y, Yamagami S, et al. Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations. *Am J Ophthalmol* 2004;137:988-92.
- 29) Cheng X, Bradley A, Hong X, Thibos LN. Relationship between refractive error and monochromatic aberrations of eye. *Optom Vis Sci* 2003;80:43-9.
- 30) Lee SJ, Kim HJ, Joo CK. Change of High-order Aberration after Wavefront-guided LASIK and LASEK. *J Korean Ophthalmol Soc* 2005;46:1848-54.
- 31) Mohamed EM, Wojtowicz JC, Bowman W, et al. Corneal thickness association with ocular and corneal high-order aberrations. *Eye Contact Lens* 2009;35:297-301.

**=ABSTRACT=**

## Preoperative Ocular Aberrations Measured by Zywave® II Aberrometer in Individuals Screened for Refractive Surgery

Young Seung Kim, MD, Byung Yi Ko, MD, PhD

*3Department of Ophthalmology, Konyang University College of Medicine, Daejeon, Korea*

**Purpose:** To report the distribution of ocular higher-order aberrations in candidates for refractive surgery measured by Zywave® II aberrometer.

**Methods:** The present study included 232 eyes of 116 subjects. Ocular aberration data were obtained by measurements per eye using Zywave® II aberrometer. The mean Zywave spherical equivalent (SE) and higher order aberrations (HOAs) calculated in the central 6-mm zone and expressed as root mean square (RMS) values were analyzed. Correlation analysis was performed to assess the association between ocular HOAs and gender, age, SE refractive error, or central corneal thickness (CCT) and investigate the aberration symmetry between right and left eyes.

**Results:** The average SE was  $-4.67 \pm 1.83$  diopters (D). The mean RMS values of total HOA, 3rd, 4th or 5th summated HOAs, coma, trefoil and spherical aberration (SA) were  $0.421 \pm 0.201 \mu\text{m}$ ,  $0.346 \pm 0.206 \mu\text{m}$ ,  $0.202 \pm 0.105 \mu\text{m}$ ,  $0.087 \pm 0.048 \mu\text{m}$ ,  $0.241 \pm 0.172 \mu\text{m}$ ,  $0.225 \pm 0.154 \mu\text{m}$  and  $0.136 \pm 0.102 \mu\text{m}$ , respectively. There was no significant differences of the mean total HOA, summated HOAs, coma, trefoil and SA between genders, age and refractive errors, but the 3rd order trefoil was strongly related with myopia ( $r = -0.900$ ,  $p = 0.008$ ). There was symmetry of ocular aberrations between both eyes and the ocular aberrations were not correlated with CCT.

**Conclusions:** Herein, we report the normative distribution of ocular aberrations in the myopic Korean population measured by Zywave® II aberrometer. The 3rd order trefoil and myopia were correlated and mirror symmetry was observed between right and left eyes.

J Korean Ophthalmol Soc 2013;54(11):1680-1687

**Key Words:** Normative distribution, Ocular aberrations, Refractive surgery candidates, Symmetry

---

Address reprint requests to **Byung Yi Ko, MD, PhD**  
Department of Ophthalmology, Konyang University Hospital  
#158 Gwanjeodong-ro, Seo-gu, Daejeon 302-718, Korea  
Tel: 82-42-600-9258, Fax: 82-42-600-9176  
E-mail: kopupil@hanmail.net