

구면수차가 다른 인공수정체를 양안에 삽입 후 안구수차 및 임상결과 분석

Comparison of Ocular Aberration and Clinical Outcome between Different Aspheric Intraocular Lenses in Both Eyes

강민구 · 유영식 · 정소향

Min Ku Kang, MD, Young Sik Yoo, MD, So Hyang Chung, MD, PhD

가톨릭대학교 의과대학 서울성모병원 안과 및 시과학교실

Department of Ophthalmology and Visual Science, Seoul St. Mary's Hospital, College of Medicine, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea

Purpose: We compared the ocular aberration and clinical outcome between different aspheric intraocular lenses (IOL) in both eyes.

Methods: This prospective randomized controlled study was comprised of patients with bilateral cataract who received two different aspheric IOLs implanted in both eyes: negatively aspheric Tecnis® ZCB00 and spherically neutral Akreos® MI60. Total and corneal aberrations computed by Wavescan® and Pentacam® were assessed at 6 months to investigate the effects of the IOL's spherical aberration on the eye and to analyze the incidence and degree of posterior capsule opacification. By using spherical aberration of the cornea and the IOLs, values calculated via Ray-tracing software and Wavescan® were compared. Total spherical aberration was analyzed by the MATLAB program and converting the pupil size to 6.0, 4.5, 3.0 mm.

Results: A total of 25 patients were included. Regarding pre-operative corneal aberration, ZCB00 group was $0.232 \pm 0.119 \mu\text{m}$ while MI60 group was $0.240 \pm 0.117 \mu\text{m}$, and there was no difference between the two IOLs. At 6 months after total ocular spherical aberration, MI60 group (pupil size 6.0 mm; $0.296 \pm 0.097 \mu\text{m}$, 4.5 mm; $0.094 \pm 0.032 \mu\text{m}$, 3.0 mm; $0.019 \pm 0.006 \mu\text{m}$) had more positive values than ZCB00 group (pupil size 6.0 mm; $0.051 \pm 0.105 \mu\text{m}$, 4.5 mm; $0.009 \pm 0.034 \mu\text{m}$, 3.0 mm; $0.002 \pm 0.007 \mu\text{m}$) ($p < 0.001$). When calculated using the ray tracing method, based on the results after surgery, MI60 group's total spherical aberrations were higher than ZCB00 group. However, from 1 month to 6 months after surgery, the uncorrected distance visual acuity, spherical equivalent and posterior capsule opacification showed no differences between the two IOLs.

Conclusions: In eyes with aspheric IOLs with negative spherical aberration, spherical aberration was lower than spherically neutral aspheric IOLs. Regarding postoperative visual acuity, spherical equivalent and posterior capsule opacification, there were no significant differences between the two groups.

J Korean Ophthalmol Soc 2017;58(5):530-538

Keywords: Aspheric intraocular lens, Cataract surgery, Ocular aberrations, Posterior capsular opacity

■ Received: 2016. 7. 7. ■ Revised: 2017. 2. 10.

■ Accepted: 2017. 4. 21.

■ Address reprint requests to **So Hyang Chung, MD, PhD**
Department of Ophthalmology, The Catholic University of
Korea Seoul St. Mary's Hospital, #222 Banpo-daero, Seocho-gu,
Seoul 06591, Korea
Tel: 82-2-2258-6203, Fax: 82-2-599-7405
E-mail: chungsh@catholic.ac.kr

백내장수술의 목표는 백내장 치료의 목적 외에도 수술을 통해 굴절 이상의 교정 및 시력의 질을 향상시키는 개념으로 점차 발전하고 있다.^{1,2} 즉 시력의 회복뿐만 아니라 시기능의 향상이 백내장수술에 있어 중요한 요소가 되고 있으며, 수차 분석은 이러한 시기능을 수치화하여 분석하는 수단으로 사용되고 있다.^{3,4} 최근에는 백내장수술 후 고위수차와 시력의 질 관계가 중요해지면서 수술 후 고위수차를 줄

이기 위한 노력이 지속되고 있다.

눈은 일종의 광학 시스템으로 이상적인 눈에서는 들어오는 빛이 망막의 한 점에 수렴하게 된다. 하지만 실제 눈은 여러 요인들에 의해 광학 시스템이 불안정하게 되어 빛이 한 점에 모이지 못하는데 이로 인해 발생하는 빛 번짐이나 상이 일그러져 보이는 현상을 수차(aberration)의 개념으로 설명하였다.⁵ 일반적으로 수차는 Zernike 공식으로 표현되며 근시, 원시, 난시와 같은 교정 가능한 저위수차와 일반 안경이나 수술로 완전한 교정이 어려운 고위수차로 나뉘어진다. 특히 빛 번짐, 대비감도 및 선명도 저하 등의 증상이 고위수차와 연관성을 가지며, 시력의 질적 저하를 일으키는 원인이 된다고 알려져 있다.⁶ 백내장수술 후 인공수정체 안의 고위수차는 각막의 수차와 삽입된 인공수정체에 의한 안구내부의 수차의 합에 의해 결정되며, 이러한 고위수차는 망막에서 이미지의 질을 저하시키는데 때로는 저위수차보다 더 많은 망막 이미지를 왜곡시킨다. 또한 이전의 연구들에 의하면 고위수차는 저위수차와 밀접한 연관성이 관찰되었는데, 예를 들어 탈초점(defocus)과 구면수차(spherical aberration), 그리고 난시(astigmatism)와 이차난시(secondary astigmatism) 간의 상호 작용이 그러하다.

예로부터 인공수정체의 기본적인 기능은 수정체가 제거된 후 눈의 광학시스템에 구면 굴절력을 추가하는 것으로 특정 생리학적 특성들을 모방하기 위한 많은 기능들이 지난 몇 년 동안 인공수정체 설계에 도입이 되었는데, 그중 하나가 비구면 인공수정체이다. 이러한 비구면 인공수정체는 렌즈 전방 및 후방의 비구면 정도에 따라 다른 양의 구면수차가 발생하게 된다. 이전의 구면 인공수정체들은 구면수차와 같은 고위수차를 증가시킴으로써 망막에 맺히는 상의 질을 저하시킨다고 알려져 있으며, 이에 여러 연구들에서 각막의 구조적 특성으로 인해 발생하는 양의 구면수차를 줄이기 위해 음의 구면수차를 갖도록 설계된 비구면 인공수정체를 삽입함으로써 우수한 대비 감도 및 향상된 고위수차 측정치를 가질 수 있음이 보고된 바 있다.^{7,8} 하지만 양의 구면수차는 초점심도(depth of focus)를 통해 위조절력(pseudo-accommodation)을 가능하게 하는 반면, 음의 구면수차를 가지게 되면 이런 위조절력에 의한 장점을 가질 수 없게 된다.⁹ 이러한 이유로 최근에는 구면수차를 0에 가깝게 만들 수 있게 고안된 작은 음의 구면수차를 가지는 인공수정체들이 소개되고 있다. Tecnis[®] ZCB00 (Advanced Medical Optics, Santa Ana, CA, USA)는 소수성 아크릴재질로 각막 구면수차를 극복하기 위해 전방 비구면렌즈로 설계되었으며, 6 mm optical zone에서 $-0.27 \mu\text{m}$ 의 구면수차 값을 가지고 있다. Akreos[®] MI60 (Bausch & Lomb, Inc., Rochester, NY, USA)은 친수성 아크릴재질로 전방 및 후방

비구면렌즈로 설계되었으며, 6 mm optical zone에서 $0 \mu\text{m}$ 의 구면수차 값을 가지고 있다.⁷ 본 연구에서는 백내장수술 시 구면수차가 다른 인공수정체를 각각 양안에 삽입한 후 수술 후 안구수차 및 시력결과에 대해 알아보았다.

대상과 방법

대상 환자

2012년 7월부터 2014년 5월까지 가톨릭대학교 서울성모병원에서 한 명의 술자에 의해 양안 수정체 초음파 유화술을 시행한 후 무작위 할당을 통해 한쪽에는 TECNIS[®] ZCB00을, 반대 안에는 Akreos[®] MI60를 삽입하고 6개월 이상 추적 관찰이 가능하였던 환자 총 25명 50안을 대상으로 전향적으로 연구를 진행하였고, 단안 수술 후 6개월 이내에 반대편안 수술을 시행하였다. 백내장 외 다른 안과적 질환이 있는 경우나 이전 안과적 수술력 및 레이저 치료 기왕력이 있는 경우, 수술 중 혹은 수술 후 합병증이 발생한 경우는 제외하였다. 또한 수술 후 시행한 세극등 검사 및 안구수차 결과상 시력 저하를 유발할 수 있다고 알려진 0.5 mm 이상의 인공수정체 중심이탈이나 6° 이상의 기울어짐이 발견된 경우는 제외하였다.¹⁰ 본 연구는 헬싱키 생의학연구윤리헌장을 준수하였고, 대상 환자들은 본 연구에 대한 충분한 설명을 들은 후 가톨릭대학교 서울성모병원 연구윤리심의위원회(과제번호 KC 16RISI0587)로부터 심의 승인을 받은 동의서에 서명을 하고 본 연구에 포함되었다.

수술 전 검사

수술 전 검사로 병력 청취, 원거리 나안시력, 현성 굴절 검사, 세극등 현미경검사, 안저 검사 및 IOL master[®] (Carl Zeiss, Jena, Germany)를 이용하여 안축장 길이 및 각막 굴절력을 측정하였으며, 측정되지 않을 경우 A-scan (Axis II[®], Quantel Medical, Cedex, France)을 이용하였다. 또한 Pentacam[®] (Oculus GmbH, Wetzlar, Germany)을 이용하여 각막 전면 및 후면의 난시와 각막수차를 측정하였다. 수술 전 목표 굴절력은 IOL master의 Sanders-Retzlaff-Kraff/Theoretical (SRK/T) 공식을 이용하여 산출하였으며, 수술 후 최대한 정시안에 가깝게 되는 것을 원칙으로 인공수정체 도수를 선택하였다.

수술 방법

술 전에 Mydrin-P[®] (Santen, Osaka, Japan)를 10분 간격으로 3회 점안하여 충분히 산동시킨 후 4% lidocaine을 이용하여 점안마취 후 수술을 진행하였다. 모든 수술은 숙련된 한 술자에 의하여 이루어졌으며, 이측 각막에 2.8 mm

크기의 투명 절개창을 만들고 앞방 내에 점탄물질을 주입한 후 앞방 집계를 사용하여 약 5-5.5 mm의 크기로 수정체 전방 원형절개를 시행하였다. 이어서 평형염액(BSS Plus®, Alcon Laboratories Inc., Fort Worth, TX, USA)을 사용하여 수력 분리술을 시행하여 수정체 핵과 겔질을 분리하였고, 수력 분출술을 시행하여 수정체 핵을 외핵과 내핵으로 분리하였다. 이후 동일한 기계(Infiniti Vision System®, Alcon Laboratories Inc., Fort Worth, TX, USA)와 OZil™ Torsional Handpiece (Alcon Laboratories Inc., Fort Worth, TX, USA)의 초음파를 이용한 수정체유화술을 사용하여 수정체 핵을 제거하였으며, 남아있는 수정체 겔질은 관류흡입기를 이용하여 제거하였다. 수정체 낭내 잔류수정체를 완전히 제거한 후 점탄 물질을 주입하고 카트리지를 이용하여 인공수정체를 낭내에 삽입하였으며, 이후 관류흡입기를 이용해 잔류 점탄물질을 제거하였다. 수술 절개창은 봉합하지 않고 평형염액으로 절개창의 양쪽 끝에 기질 수화(stromal hydration)를 시행하였다.

수술 후 검사 및 분석

Pentacam®의 90°와 180° Scheimpflug image를 통해 인공수정체의 기울어짐(경사각)과 중심이탈 정도를 확인하였다. 또한 Sasaki et al¹¹이 제시한 방법을 이용하여 인공수정체의 기울어짐 정도는 시축과 인공수정체의 광축 간의 기울어진 정도를 분석하여 각도(°)로, 중심이탈 정도는 시축과 인공수정체 광학부의 꼭지점의 수직 거리(mm)를 측정하여 표시하였다.

수술 후 1일, 1개월, 3개월 그리고 6개월에 현성 굴절검사로 구면대응치(spherical equivalent)를 구하였고, logMAR 나안시력을 표준 실내 조명 아래에서 동일한 검사자에 의

해 측정하였다. 수술 전 및 수술 후 6개월에 각막 구면수차는 Pentacam®으로, 전체 안구수차(total ocular aberration)는 WaveScan® (VISX™, Abbott Laboratories Inc., Santa Ana, CA, USA) 수차계를 이용하여 검사하였다. 측정된 수차는 Zernike 상수로 표시하였으며 구면수차(spherical aberration, Z_4^0), 수직 및 수평의 코마 수차(vertical and horizontal coma aberration, coma 7: Z_3^{-1} , coma 8: Z_3^1), 수직 및 수평의 트레foil 수차(vertical and horizontal trefoil aberration; trefoil 6: Z_3^{-3} , trefoil 9: Z_3^3), 총 고위 수차의 root mean square 값 (3rd to 6th order, RMS HoA), 총 수차의 root mean square 값(RMS total)을 분석하였다. WaveScan® 검사 전에는 산동을 하여 동공 크기가 6 mm 이상인 조건에서 전체 안구의 구면수차를 측정하였다. WaveScan®에서 analysis diameter가 일정하게 고정되지 않기 때문에 수차 측정시의 동공 크기 정보를 확인한 후, MATLAB (MathWorks, Natick, MA, USA) 프로그램을 이용하여 구면수차 값을 동공 크기가 6 mm로 설정하였을 때의 구면수차 값으로 변환하였다.

Ray-tracing software ZEMAX® (Radiant Zemax, Redmond, WA, USA)로 전체 안구의 구면수차를 계산하였다. 수술 후 6개월에 측정된 Pentacam®에서 각막 전면과 후면의 수차(6.0 mm 기준), 각막 두께, 전방 깊이 측정값을 얻었고, 본 연구에 이용된 두 가지 인공수정체의 구면수차값(6.0 mm 기준)을 이용하였다. 또한 WaveScan®으로 측정하거나 ZEMAX®로 계산된 전체 안구의 구면수차(total ocular spherical aberration)를 MATLAB 프로그램을 이용하여 6.0 mm, 4.5 mm, 3.0 mm 동공크기로 각각 변환하여 분석하였다.

후방 혼탁의 정도는 수술 후 6개월에 산동 후 세극등 역조명법으로 사진 촬영을 시행한 후 POComan (St. Thomas

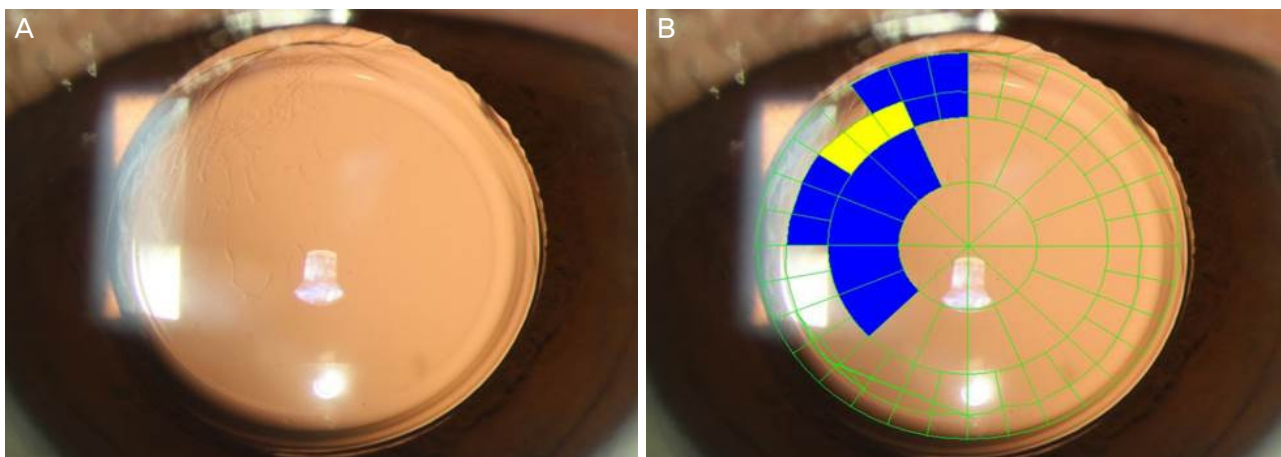


Figure 1. Posterior capsule opacification (PCO) severity grading with POComan software. (A) Retroilluminated slit lamp photographs 6 months postoperatively. (B) PCO score with POComan software. The severity score is calculated according to the formula: (Blue × 1 + Yellow × 2 + Red × 3)/total area.

Hospital and King's College) 프로그램을 이용하여 비교 분석하였다. 역반사 조명을 이용하여 찍은 디지털이미지를 bitmap format으로 전환한 후 인공수정체 가장자리를 프로그램에 내장된 circle-drawing tool을 이용하여 정한 후 전방의 절개면을 short chords를 이용하여 정하였다. 3개의 동일 면적의 동심원이 방사선들에 의해 나뉘어져 생긴 격자가 인공수정체 전면을 덮어 동일 면적의 56개 분절이 되도록 하였다. 검사자는 각각의 분절을 Bender et al¹²이 정한 후낭 혼탁 등급에 따라 각 분절이 50% 이상 혼탁이 있는 경우 가벼움(grade 1, 파란색), 중등도(grade 2, 노란색), 심한 정도(grade 3, 빨간색)로 표시하였다. POComan severity score는 '(grade 1 범위 × 1)+(grade 2 범위 × 2)+(grade 3 범위 × 3)'을 전체 범위로 나누어 계산하였다(Fig. 1).

통계적 분석 방법

Pentacam[®]을 이용한 각막수차 분석, Wavescan[®]과 ZEMAX[®]를 이용한 수술 후 전체 안구 구면수차의 분석, 수술 후 후낭 혼탁 정도 비교에 independent *t*-test를 이용하였고, 수술 전후의 각막수차 변화 분석에는 paired *t*-test를 이용하였다.

모든 수치는 평균 ± 표준편차의 형식으로 나타내었고, *p*값이 0.05보다 작은 경우에 통계학적으로 유의한 것으로 간주하였다. 통계 프로그램은 SPSS for Windows (version 22.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 이용하였다.

결 과

본 연구에 총 25명의 환자, 50안이 등록되었다. 술 전 안축장 길이, 각막전면난시, 각막후면난시, 전방 깊이, 각막내피세포수는 두 군 간에 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Table 1). 삽입된 인공수정체의 수술 후 중심이탈 정도는 ZCB00군이 0.23 ± 0.15 mm, MI60군이 0.19 ± 0.08 mm였고, 평균 경사각은 ZCB00군이 1.79 ± 0.73°, MI60군이 1.43 ± 0.45°로 평균중심이탈과 평균경사각 모두 두 군 간에 차이가 없었다(*p*=0.38, *p*=0.45). 구면수차를 포함한 수술 전의 각막수차(corneal aberration)는 두 군 간 유의한 차이를 보이지 않았고, 각 군에서 수술 전과 후의 각막수차도 유의한 차이가 없었다(Table 2).

수술 후 6개월째 측정된 전체 안구 구면수차는 MI60군

Table 1. Patient demographics and pre-operative biometry values of both groups

	Akreos [®] MI-60	TECNIS [®] ZCB00	<i>p</i> -value*
Age (years)	71 (ranged from 52 to 82)	71 (ranged from 52 to 82)	N/A
Gender (male) (n, %)	11 (44)	11 (44)	N/A
AL (mm)	23.62 ± 0.64	23.40 ± 0.84	0.520
Front corneal astigmatism (D)	43.60 ± 1.78	43.56 ± 1.74	0.628
Back corneal astigmatism (D)	-6.23 ± 0.28	-6.28 ± 0.43	0.379
ACD (mm)	3.32 ± 0.29	3.34 ± 0.38	0.412
ECD (cell/mm ²)	2,832 ± 298	2,798 ± 539	0.651

Values are presented as mean ± SD unless otherwise indicated.

N/A = not applicable; AL = axial length; ACD = anterior chamber depth; ECD = endothelial cell density.

**p*-valued on independent *t*-test.

Table 2. Preoperative and postoperative corneal aberrations measured by Pentacam[®]

	Pre			Post			Differences	
	MI60	ZCB00	<i>p</i> -value*	MI60	ZCB00	<i>p</i> -value*	Pre/Post	<i>p</i> -value†
RMS total	1.303 ± 0.549	1.162 ± 0.488	0.435	1.303 ± 0.613	1.510 ± 0.644	0.377	0.262	0.315
RMS HOA	0.477 ± 0.228	0.440 ± 0.187	0.605	0.422 ± 0.231	0.460 ± 0.201	0.628	0.279	0.243
Coma	0.140 ± 0.097	0.147 ± 0.089	0.848	0.128 ± 0.079	0.146 ± 0.097	0.582	0.618	0.552
Vertical Coma, Z ₃ ⁻¹	0.031 ± 0.112	-0.020 ± 0.134	0.227	0.036 ± 0.098	-0.036 ± 0.161	0.146	0.659	0.294
Horizontal Coma, Z ₃ ¹	0.031 ± 0.214	0.009 ± 0.207	0.763	0.080 ± 0.174	0.069 ± 0.182	0.862	0.177	0.401
Trefoil	0.164 ± 0.136	0.130 ± 0.091	0.394	0.126 ± 0.117	0.132 ± 0.115	0.888	0.102	0.197
Vertical Trefoil, Z ₃ ⁻³	-0.041 ± 0.171	0.051 ± 0.139	0.564	0.035 ± 0.113	0.030 ± 0.142	0.909	0.540	0.429
Oblique Trefoil, Z ₃ ³	-0.079 ± 0.239	-0.039 ± 0.171	0.581	-0.059 ± 0.209	-0.060 ± 0.199	0.991	0.157	0.288
Spherical aberration, Z ₄ ⁰	0.240 ± 0.117	0.232 ± 0.119	0.834	0.235 ± 0.133	0.236 ± 0.157	0.753	0.492	0.667

Values are presented as mean ± SD unless otherwise indicated.

RMS = root mean square; HOA = higher order aberration.

**p*-valued on independent *t*-test; †*p*-valued on paired *t*-test.

Table 3. Post-operative total ocular spherical aberrations values measured from Wavescan® and calculated by ray-tracing method

	Akreos® MI-60	TECNIS® ZCB00	<i>p</i> -value ^{*,†}
6.0 mm Pupil			
Wavescan®	0.296 ± 0.097	0.051 ± 0.105	<0.001
Ray Tracing Method	0.356 ± 0.116	0.225 ± 0.102	0.001
4.5 mm Pupil			
Wavescan®	0.094 ± 0.032	0.009 ± 0.034	<0.001
Ray Tracing Method	0.116 ± 0.038	0.076 ± 0.033	0.002
3.0 mm Pupil			
Wavescan®	0.019 ± 0.006	0.002 ± 0.007	<0.001
Ray Tracing Method	0.024 ± 0.008	0.015 ± 0.007	0.003

Values are presented as mean ± SD unless otherwise indicated.

**p*-valued on independent *t*-test; †Statistically significant (*p* ≤ 0.05).

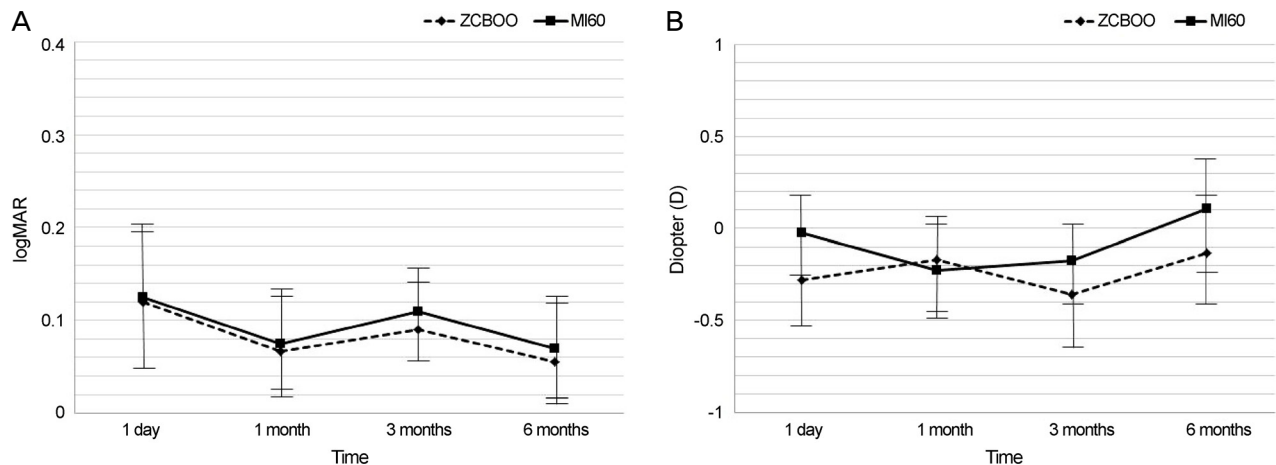


Figure 2. Visual acuity and manifest refraction at 6 months postoperatively. (A) Uncorrected distance visual acuity (UDVA, logMAR). (B) Spherical equivalent. There was no difference in UDVA and spherical equivalent between the 2 intraocular lens groups.

Table 4. The POComan values at the 6-month follow-up

Parameters	Akreos® MI-60	TECNIS® ZCB00	<i>p</i> -value [*]
Percentage PCO (%)	17.60 ± 5.21	15.72 ± 4.91	0.139
Severity grade (POComan severity score)	0.176 ± 0.108	0.167 ± 0.141	0.248

Values are presented as mean ± SD unless otherwise indicated.

PCO = posterior capsular opacification.

**p*-valued on independent *t*-test.

(동공크기 6.0 mm; 0.296 ± 0.097 μm, 4.5 mm; 0.094 ± 0.032 μm, 3.0 mm; 0.019 ± 0.006 μm)이 ZCB00군(동공크기 6.0 mm; 0.051 ± 0.105 μm, 4.5 mm; 0.009 ± 0.034 μm, 3.0 mm; 0.002 ± 0.007 μm)보다 양의 구면수차 값으로 크게 측정되었다(*p*<0.001). 수술 후의 정보에 기반하여 Ray tracing method로 계산하였을 때에도 전체 안구 구면수차는 MI60군이 ZCB00군보다 양의 값으로 크게 측정되었다. 6.0 mm 동공크기에서 Wavescan®으로 측정하거나 ZEMAX®로 계산된 전체 안구의 구면수차는 ZCB00군(0.051 ± 0.105 μm, 0.225 ± 0.102 μm)이 MI60군(0.296 ± 0.097 μm, 0.356 ± 0.116 μm)보다 작았다(*p*<0.001, *p*=0.001). 두 군 모두에서

4.5 mm와 3.0 mm의 동공크기에서는 6.0 mm 동공크기에서보다 구면수차 값이 감소하였고, ZCB00군이 MI60군보다 구면수차의 값이 작았다(Table 3).

수술 후 1일, 1개월, 3개월, 6개월에 측정한 원거리 logMAR 나안시력 및 구면 대응치는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았고(Fig. 2), 수술 후 6개월에 분석한 후낭 혼탁정도인 POComan severity score 역시 두 군 간의 차이는 없었다(ZCB00군: 0.167 ± 0.141, MI60군: 0.176 ± 0.108, *p*=0.248) (Table 4).

고 찰

본 연구의 목적은 음의 구면수차 값을 가지는 비구면 인공수정체를 이용하여 각막의 양의 구면수차 값이 임상적으로 교정되는 양과 그로 인한 시력의 변화를 알아보는 것이었다. 전향적 코호트를 구성하여 연구한 결과, 음의 구면수차 값을 가지는 비구면 인공수정체를 삽입한 눈에서 마이크로 단위의 전체 안구 구면수차 값은 변화하였지만, logMAR 단위의 시력 값은 통계적으로 유의한 변화를 발견하지 못하였다. 본 연구에서 구면수차의 값을 6.0 mm의 동공 크기를 기준으로 측정하였고, 나안시력 측정과 현성 굴절검사를 300-500 lux의 일정한 밝기의 실내에서 시행하였기 때문에 동공 크기가 6.0 mm보다 작게 되었기 때문일 것으로 생각된다. 구면수차는 측정 범위가 작아지면 그 값이 작아지고 구면대응치에 미치는 영향도 줄어들게 된다. 본 연구에서 MATLAB[®]을 이용하여 동공크기를 6.0 mm, 4.5 mm (mesopic condition), 3.0 mm (photopic condition)로 각각 변환하였을 때, 동공크기가 작아질수록 구면수차 값이 작아짐을 확인할 수 있었다. 따라서 동공이 커지는 박명시 (mesopic condition)에서 구면수차 값에 따른 구면대응치와 나안시력 변화가 나타날 수 있을 것으로 예상된다.

구면수차는 광축 위에 있는 물체점에서 나온 빛이 통과하는 렌즈 위치에 따라 맺어지는 초점의 위치가 달라져 광축의 한 점에서 만나지 못하여 발생한다. 비구면 인공수정체는 각막의 구면수차를 상쇄하고 기존 수정체의 생리적 특성과 유사한 작용을 하도록 Werner와 Roth에 의해 처음 개발되었고,¹³ 이러한 비구면 인공수정체를 삽입함으로써 박명시(mesopic)에서 대비감도를 향상시킬 수 있고, 동공크기가 클 때 근시변화를 줄일 수 있음이 여러 연구들에 의해 밝혀졌다. 저자들은 본 연구에서 구면수차가 서로 다른 두 인공수정체 Tecnis[®] ZCB00과 Akreos[®] MI60를 이용, 동일한 검사자가 표준 프로토콜을 사용하여 모든 눈에서 동일한 평가를 통해 수술 후 6개월까지 나안시력, 구면 대응치, 그리고 안구 수차를 측정 및 비교하였다.

나안시력과 구면 대응치는 수술 후 6개월까지 모두 두 군에서 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다. Mester et al¹⁴은 서로 다른 두 안에서의 비구면, 구면 인공수정체 분석에서 비구면 인공수정체에서 낮은 대비에서의 시력이 더 우수하였다고 보고하였으나, 대부분의 연구들에서는 두 인공수정체 간에 나안 및 최대교정시력에서 차이가 없었다.¹⁵⁻¹⁸ 본 연구에서는 두 개의 비구면 인공수정체가 가지고 있는 음의 구면수차가 수술 후 전체 안구 구면수차에 영향을 주는 것을 Wavescan[®] 측정치와 ZEMAX[®]를 이용한 계산값을 통하여 확인하였다.

ZEMAX[®]로 전체 안구 구면수차를 계산하였을 때, 각막과 인공수정체의 거리 변화가 있으면 인공수정체가 가진 구면수차의 각막 구면수차에 대한 보정효과가 달라질 수 있다. 음의 구면수차를 가진 인공수정체(Tecnis[®] ZCB00)의 경우 인공수정체의 위치에 따라 전체 안구의 구면수차의 값이 달라진다. 수술 후 Pentacam[®]으로 측정한 전방깊이가 실제 인공수정체의 위치와 오차가 발생하는 요인은 다음과 같은 두 가지로 설명할 수 있다. 첫째, Wavescan[®]이 인식하는 실제 인공수정체의 위치와 Pentacam[®]의 전방깊이 사이의 측정값이 다를 수 있다. 둘째, Pentacam[®]에서 전방깊이를 측정하는 원리는 rotating scheimpflug camera를 이용하여 얻은 영상으로부터 전방을 재구성하는 방식이기 때문에 실제 전방깊이와 차이가 나타날 수 있다. 이로 인해, 본 연구에서 Akreos[®] MI60군과 달리 Tecnis[®] ZCB00군에서 인공수정체가 가진 음의 구면수차가 전체 안구의 구면수차에 기여한 바가 작았던 것으로 생각된다.

Akreos[®] MI60군에서 두 가지 측정방법 모두에서 각막 전체의 구면수차의 평균값이 Pentacam[®]에서 측정한 각막의 구면수차의 평균값보다 커진 결과가 나왔는데, 이는 25명의 적은 대상자 수로 인한 편향으로 생각된다. 이를 확인하기 위해 수술 후 Pentacam[®]에서 측정된 각막수차와 두 가지 분석방법으로 계산된 안구 전체의 구면수차값에 차이가 있는지 paired t-test를 시행하였다. Pentacam[®]에서 측정된 각막수차는 Wavescan[®]에서 측정되었거나 ZEMAX[®]로부터 계산된 전체 안구의 구면수차와 차이가 없었다 ($p=0.33, 0.08$).

코마, 트레포일 및 그 외의 수차들에서는 두 군 간에 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다. 수정체의 위치, 크기, 각막절개 등이 수술 시 유발될 수 있는 수차, 특히 비회전 축대칭 수차인 코마, 트레포일 수차에 관여한다고 알려져 있다.¹⁹ 메타 분석을 포함한 여러 연구들에서 코마와 관련된 수차(coma-like aberrations)들은 인공수정체 기울어짐과 관련이 있고, 인공수정체 이탈과는 관련이 적다고 보고하였다.^{20,21} 본 연구에서 백내장수술 후 6개월간의 경과 관찰 기간 동안 0.5 mm 이상의 인공수정체 이탈이나 6° 이상의 기울어짐 등의 합병증은 발생하지 않았으므로 이를 토대로, 구면수차가 다른 여러 인공수정체를 삽입하더라도 수술 시 유발될 수 있는 코마, 트레포일 수차에는 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

한편 후낭 혼탁은 백내장수술 후 발생할 수 있는 시력 저하의 가장 흔한 원인 중 하나로, 후낭 혼탁이 시축에 발생하게 되면 심각한 시력 저하까지 발생할 수 있다. 현재까지 여러 연구들을 통해 후낭 혼탁에 영향을 미치는 인공수정체의 요소들로 재질, 수정체 지지부의 형태, 광학부 후면

모서리 모양 등에 대해 보고가 되었으며, 소수성 아크릴 재질에서보다 친수성 아크릴 재질에서, 인공수정체 광학부 후면 모서리 모양이 각진 모양보다 둥근 모서리 모양에서 후낭 혼탁이 잘 발생한다고 알려져 있다.²²⁻²⁸ 본 연구에서는 서로 다른 재질의 각진 광학부 후면 모서리 디자인을 가지는 두 인공수정체; 소수성 아크릴 재질의 Tecnis[®] ZCB00과 친수성 아크릴 재질의 Akreos[®] MI60를 이용하여 수술 후 6개월 뒤 후낭 혼탁 정도를 비교한 결과 두 인공수정체 간에 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 반면 보다 장기적인 분석을 한 Li et al²⁹의 친수성 및 소수성 아크릴 재질의 인공수정체 간 수술 후 1년 및 2년 후 분석에서는 소수성 아크릴 재질의 인공수정체에서 후낭 혼탁 정도가 적은 것으로 보고하였다. 이는 소수성 아크릴 재질의 인공수정체에서는 콜라겐 막이 잘 결합할 수 있어 후낭 안에 인공수정체가 보다 더 단단히 위치할 수 있고,³⁰ 섬유결합소(fibronectin)가 잘 유착할 수 있게 되어 이를 통해 수정체 상피세포가 생길 수 있는 후낭과 인공수정체 간의 빈 공간이 줄어들게 된다. 반면 친수성 아크릴 재질은 수정체 상피세포의 분화, 증식 및 적도부위에서 시축으로의 이동을 용이하게 하여 후낭 혼탁을 유발할 수 있음이 알려져 있다.³¹ 본 연구에서는 6개월이라는 다소 짧은 경과 관찰기간으로 인하여 두 인공수정체 간에 유의한 차이가 없었을 수 있으므로 보다 장기적인 경과 관찰을 통한 연구가 필요하겠다.

백내장을 적출하고 인공수정체를 삽입하게 되면 우리 눈은 초점심도를 늘리는 위조절력(pseudo-accommodation)을 통해 근거리 시력 향상을 얻게 된다.⁹ 그동안 노안을 극복하기 위해 돋보기 안경, 콘택트렌즈, 다초점 인공수정체 그리고 레이저 각막굴절수술 등이 개발되어 왔으나 안경이나 콘택트렌즈 착용은 많은 불편감을 야기하여 좋은 대안이 될 수 없었으며, 다초점 인공수정체의 경우 비교적 좋은 결과를 보여주었지만 모든 백내장 환자들에게 적용할 수 없다는 단점이 있다. 최근 몇 년 동안 음의 구면수차를 가지는 인공수정체를 흔히 사용함에 따라 이러한 인공수정체를 삽입한 환자들에서 근거리 시력 향상을 일으킬 수 있는 요인들에 대한 연구가 중요해져 왔으며, 수술 후 잔여근시, 도난시, 동공 크기 그리고 고위수차들이 초점심도를 증가시킬 수 있는 요인들로 알려져 있다. 이전의 여러 연구들을 통해 구면 인공수정체를 삽입했을 경우 비구면 인공수정체에 비해 근거리 시력이 우수함이 밝혀졌는데, Marcos et al³²은 구면 인공수정체가 비구면 인공수정체에 비해 초점심도가 유의하게 높은 결과를 보였다고 발표하였고, Rocha et al³³은 비구면 인공수정체를 삽입함으로써 구면수차가 감소하게 되면 근거리 및 중간거리 시력이 떨어진다고 주장하였다. 반면 Jeong et al³⁴은 인공수정체가 비구면이나

구면 여부의 차이가 수술 후 초점심도에 주는 영향보다는 수술 후 잔여 구면수차에 따라 유발되는 초점심도의 차이가 더 큰 영향을 끼치기 때문에 각막의 수차를 개개인마다 측정하여 비구면 인공수정체를 선택하는 것이 바람직하다고 하였다.

본 연구의 제한점으로 첫째, 상대적으로 적은 대상 환자수이다. 이는 다소 제한적인 포함기준 때문으로 생각되며, 두 번째 제한점으로는 6개월이라는 다소 짧은 경과 관찰기간이 있겠다. 결론적으로 각막의 양의 구면수차를 보정하는 데 있어서 음의 구면수차를 가지는 비구면 인공수정체가 구면수차가 없는 비구면 인공수정체보다 효과적임을 확인하였다. 하지만, 인공수정체의 구면수차값의 차이가 수술 후 나안시력, 구면대응치, 후낭혼탁에 영향을 주지는 않았다.

REFERENCES

- 1) Werner L, Olson RJ, Mamalis N. New technology IOL optics. *Ophthalmol Clin North Am* 2006;19:469-83.
- 2) Holladay JT, Piers PA, Koranyi G, et al. A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eyes. *J Refract Surg* 2002;18:683-91.
- 3) Rawer R, Stork W, Spraul CW, Lingenfelder C. Imaging quality of intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 2005;31:1618-31.
- 4) Guirao A, Redondo M, Geraghty E, et al. Corneal optical aberrations and retinal image quality in patients in whom monofocal intraocular lenses were implanted. *Arch Ophthalmol* 2002;120:1143-51.
- 5) Lombardo M, Lombardo G. Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance. *J Cataract Refract Surg* 2010;36:313-31.
- 6) Williams D, Yoon GY, Porter J, et al. Visual benefit of correcting higher order aberrations of the eye. *J Refract Surg* 2000;16:S554-9.
- 7) Montés-Micó R, Ferrer-Blasco T, Cerviño A. Analysis of the possible benefits of aspheric intraocular lenses: review of the literature. *J Cataract Refract Surg* 2009;35:172-81.
- 8) Nochez Y, Favard A, Majzoub S, Pisella PJ. Measurement of corneal aberrations for customisation of intraocular lens asphericity: impact on quality of vision after micro-incision cataract surgery. *Br J Ophthalmol* 2010;94:440-4.
- 9) Nanavaty MA, Spalton DJ, Boyce J, et al. Wavefront aberrations, depth of focus, and contrast sensitivity with aspheric and spherical intraocular lenses: fellow-eye study. *J Cataract Refract Surg* 2009;35:663-71.
- 10) McKelvie J, McArdle B, McGhee C. The influence of tilt, decentration, and pupil size on the higher-order aberration profile of aspheric intraocular lenses. *Ophthalmology* 2011;118:1724-31.
- 11) Sasaki K, Sakamoto Y, Shibata T, et al. Measurement of post-operative intraocular lens tilting and decentration using Scheimpflug images. *J Cataract Refract Surg* 1989;15:454-7.
- 12) Bender L, Spalton DJ, Uyanonvara B, et al. POComan: new system for quantifying posterior capsule opacification. *J Cataract Refract Surg* 2004;30:2058-63.

- 13) Werner W, Roth EH. Image properties of spherical as aspheric intraocular lenses. *Klin Monbl Augenheilkd* 1999;214:246-50.
- 14) Mester U, Dillinger P, Anterist N. Impact of a modified optic design on visual function: clinical comparative study. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:652-60.
- 15) Kershner RM. Retinal image contrast and functional visual performance with aspheric, silicone, and acrylic intraocular lenses. Prospective evaluation. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:1684-94.
- 16) Pandita D, Raj SM, Vasavada VA, et al. Contrast sensitivity and glare disability after implantation of AcrySof IQ Natural aspherical intraocular lens: prospective randomized masked clinical trial. *J Cataract Refract Surg* 2007;33:603-10.
- 17) Tzelikis PF, Akaishi L, Trindade FC, Boteon JE. Spherical aberration and contrast sensitivity in eyes implanted with aspheric and spherical intraocular lenses: a comparative study. *Am J Ophthalmol* 2008;145:827-33.
- 18) Rocha KM, Soriano ES, Chalita MR, et al. Wavefront analysis and contrast sensitivity of aspheric and spherical intraocular lenses: a randomized prospective study. *Am J Ophthalmol* 2006;142:750-6.
- 19) Guirao A, Tejedor J, Artal P. Corneal aberrations before and after small-incision cataract surgery. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2004;45:4312-9.
- 20) Oshika T, Sugita G, Miyata K, et al. Influence of tilt and decentration of scleral-sutured intraocular lens on ocular higher-order wavefront aberration. *Br J Ophthalmol* 2007;91:185-8.
- 21) Taketani F, Matuura T, Yukawa E, Hara Y. Influence of intraocular lens tilt and decentration on wavefront aberrations. *J Cataract Refract Surg* 2004;30:2158-62.
- 22) Suh Y, Oh C, Kim HM. Comparison of the long-term clinical results of hydrophilic and hydrophobic acrylic intraocular lenses. *Korean J Ophthalmol* 2005;19:29-33.
- 23) Heatley CJ, Spalton DJ, Kumar A, et al. Comparison of posterior capsule opacification rates between hydrophilic and hydrophobic single-piece acrylic intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 2005;31:718-24.
- 24) Auffarth GU, Golescu A, Becker KA, Völcker HE. Quantification of posterior capsule opacification with round and sharp edge intraocular lenses. *Ophthalmology* 2003;110:772-80.
- 25) Morgan-Warren PJ, Smith JA. Intraocular lens-edge design and material factors contributing to posterior-capsulotomy rates: comparing Hoya FY60aD, PY60aD, and AcrySof SN60WF. *Clin Ophthalmol* 2013;7:1661-7.
- 26) Vock L, Menapace R, Stifter E, et al. Posterior capsule opacification and neodymium:YAG laser capsulotomy rates with a round-edged silicone and a sharp-edged hydrophobic acrylic intraocular lens 10 years after surgery. *J Cataract Refract Surg* 2009;35:459-65.
- 27) Vasavada AR, Raj SM, Shah A, et al. Comparison of posterior capsule opacification with hydrophobic acrylic and hydrophilic acrylic intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 2011;37:1050-9.
- 28) Nanavaty MA, Spalton DJ, Gala KB, et al. Fellow-eye comparison of posterior capsule opacification between 2 aspheric microincision intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 2013;39:705-11.
- 29) Li Y, Wang J, Chen Z, Tang X. Effect of hydrophobic acrylic versus hydrophilic acrylic intraocular lens on posterior capsule opacification: meta-analysis. *PLoS One* 2013;8:e77864.
- 30) Nagata T, Minakata A, Watanabe I. Adhesiveness of AcrySof to a collagen film. *J Cataract Refract Surg* 1998;24:367-70.
- 31) Dorey MW, Brownstein S, Hill VE, et al. Proposed pathogenesis for the delayed postoperative opacification of the hydroview hydrogel intraocular lens. *Am J Ophthalmol* 2003;135:591-8.
- 32) Marcos S, Barbero S, Jiménez-Alfaro I. Optical quality and depth-of-field of eyes implanted with spherical and aspheric intraocular lenses. *J Refract Surg* 2005;21:223-35.
- 33) Rocha KM, Soriano ES, Chamon W, et al. Spherical aberration and depth of focus in eyes implanted with aspheric and spherical intraocular lenses: a prospective randomized study. *Ophthalmology* 2007;114:2050-4.
- 34) Jeong JH, Kim MK, Wee WR, Lee JH. Comparison of optical performances in eyes implanted with aspheric and spherical intraocular lenses after cataract surgery. *J Korean Ophthalmol Soc* 2010;51:1445-52.

= 국문초록 =

구면수차가 다른 인공수정체를 양안에 삽입 후 안구수차 및 임상결과 분석

목적: 백내장수술 시 구면수차 값이 다른 비구면 인공수정체를 양안에 삽입한 환자들의 안구수차 및 임상결과를 비교하였다.

대상과 방법: 본 연구는 전향적 코호트 연구로 양안 수정체유화술 후 한쪽에는 음의 구면수차 값을 가지는 인공수정체(ZCB00)를, 반대 안에는 구면수차 값이 0인 인공수정체(MI60)를 삽입 후 수술 후 6개월까지 나안시력과 현성굴절력을 측정하였다. 인공수정체가 가지는 구면수차가 수술 후 안구수차에 미치는 영향을 알아보기 위해 수술 후 6개월째에 전체 안구수차와 각막수차를 Wavescan[®]과 Pentacam[®]을 이용하여 각각 측정하였고, 후낭혼탁의 발생과 정도를 분석하였다. 각막의 구면수차와 인공수정체의 구면수차를 이용하여 Ray-tracing software로 계산된 전체 안구의 구면수차를 Wavescan[®]으로 측정한 값과 비교하였다. 전체 안구의 구면수차 값은 MATLAB 프로그램으로 동공 크기를 6.0, 4.5, 3.0 mm로 변환하여 분석하였다.

결과: 총 25명의 환자가 등록되었고, 수술 전 각막 구면수차는 ZCB00군이 $0.232 \pm 0.119 \mu\text{m}$, MI60군은 $0.240 \pm 0.117 \mu\text{m}$ 였고, 두 군 간 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 수술 후 6개월째에 측정한 전체 안구 구면수차는 MI60군(동공크기 6.0 mm; $0.296 \pm 0.097 \mu\text{m}$, 4.5 mm; $0.094 \pm 0.032 \mu\text{m}$, 3.0 mm; $0.019 \pm 0.006 \mu\text{m}$)이 ZCB00군(동공크기 6.0 mm; $0.051 \pm 0.105 \mu\text{m}$, 4.5 mm; $0.009 \pm 0.034 \mu\text{m}$, 3.0 mm; $0.002 \pm 0.007 \mu\text{m}$)보다 양의 구면수차 값이 많았다($p < 0.001$). 수술 후의 정보에 기반하여 Ray tracing method로 계산하였을 때에도 전체 안구 구면수차는 MI60군이 ZCB00군보다 많았다. 하지만 수술 후 1개월부터 6개월까지의 나안시력 및 구면대응치와 수술 후 6개월에 비교한 후낭혼탁의 정도는 두 군 간에 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

결론: 음의 구면수차를 가지는 비구면 인공수정체를 넣은 안에서 구면수차가 없는 비구면 인공수정체를 넣은 안보다 수술 후 구면수차가 낮게 측정되었다. 수술 후 나안시력, 구면대응치, 후낭혼탁의 측면에서 두 군 간의 차이는 보이지 않았다.

〈대한안과학회지 2017;58(5):530-538〉