

Hoffer Q와 SRK/T 인공수정체 도수 계산 공식의 이론적 임상적 비교

정진호 · 김성곤 · 이혜진 · 이선호 · 차동민

제주대학교 의학전문대학원 안과학교실

목적: Hoffer Q와 SRK/T 도수 계산공식의 정확도를 평가하고, 두 공식 간의 차이를 유발하는 생체 계측인자를 확인한다.

대상과 방법: 본 연구는 전향적 연구방법으로 시행되었으며, 1명의 술자에 의해 합병증 없이 시행된 365안의 백내장 수술안에 대하여 접촉 초음파 안계측기를 사용하여 안축장을 측정하였으며, Hoffer Q 및 SRK/T 공식을 사용하여 인공수정체 도수를 정하였고, 두 도수 계산공식의 예측치 차이(expected disparity between the formulas, EDF)와 술전 생체계측인자들과의 상관성을 분석하였다. 수술 후 6주째에 현성굴절검사를 시행하여 공식의 술후 오차를 측정하였고, 다중회귀분석을 시행하여 공식의 오차에 술전 생체 계측인자들이 미치는 영향을 분석하였다.

결과: 전체 환자군의 17.8%에서 EDF의 크기가 0.4디옵터를 초과하였다. EDF는 각막곡률과 안축장의 곱과 높은 상관관계를 보였다($R^2=0.855$, $p<0.001$). 다중 회귀 분석상 각막 난시, 전방깊이, 수정체 두께가 두 도수계산공식의 술후 오차 정도에 유의한 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

결론: 두 공식은 정확한 인공수정체 도수를 예측하는데 있어 전반적으로 매우 우수하였다. 두 도수 계산공식간의 예측치 차이는 각막곡률과 안축장의 곱과 매우 높은 상관관계를 나타내었다. 공식들의 오차정도는 각막 난시나 전방깊이, 또는 수정체 두께와 같이 Hoffer Q 공식이나 SRK/T 공식의 계산에 포함되지 않는 인자의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

〈대한안과학회지 2014;55(1):85-92〉

백내장 수술 후 가끔 수술 전 예상치와 많이 다른 술후 굴절치가 나타나는 경우가 있다. 최근에는 Haigis 인공수정체(intraocular lens, IOL) 도수 공식이 술 후 굴절 결과를 예측하는데 있어 높은 정확도를 나타내고 있으며, 레이저 간섭 측정법을 사용하여 측정한 전방 깊이의 실제 측정치를 인공수정체 도수 계산에 반영한다.¹ 그렇지만 레이저 간섭 측정계가 구비되지 않은 병원에서는 기존의 초음파 측정방식도 여전히 널리 사용되고 있으며, 환자의 신체적 상태가 앓을 수 없는 상황이거나, 성숙 백내장 또는 후낭하 혼탁이 심한 백내장에서는 레이저 간섭측정기로 결과를 얻을 수 없는 경우가 많고 이 경우 초음파 측정방식을 사용해야 하기에, 아직은 레이저 간섭측정기가 초음파 측정방법을 완전히 대체할 수는 없는 상황이다.² 따라서 기존의 초음파 측정방법으로 계산할 수 있는 인공수정체 도수계산 공식 가운데, 3세대 계산공식으로 불려지는 SRK/T 및 Hoffer Q

공식은 여전히 임상적인 유용성을 가지고 널리 사용되고 있다.

전방 깊이는 기존의 초음파 방식으로 측정은 가능하지만, 3세대 회귀추정 계산공식에는 유효 렌즈 위치(effective lens position, ELP)의 계산에 전방깊이의 실측치를 사용하지 않고, 각막곡률치와 안축장의 측정치로부터 추정하는 방식을 사용하고 있다.³ ELP를 추정하는 방법은 도수계산공식마다 다른 기전을 사용하기에, 이에 따른 술후 굴절예측값 역시 차이가 발생한다. 인공수정체 도수계산 공식의 정확도를 비교하기 위하여, 수술전 굴절 예측치와 수술 후 실제 굴절값과의 차이를 측정하여 그 절대값의 평균값(mean absolute errors, MAE)을 임상적으로 비교하는 방법은 비교적 다양한 연구에서 시도되어 왔지만, 과연 어떠한 경우에 술전 굴절 예측치가 도수 계산공식들마다 어떠한 정도로 차이가 발생하게 되는지를 수학적으로 분석한 논문은 아직 충분하지 않다.⁴⁻⁷

대부분의 안과의사들이 백내장 수술시, 2개 이상의 도수 계산공식들의 결과를 비교한다는 것을 고려할 때, 도수 계산공식들 간에 서로 예측치가 많이 다른 경우, 인공수정체 도수 선택에 있어 혼란을 겪을 수 있다. 본 연구에서 저자들은 Hoffer Q 및 SRK/T 공식들이 어떠한 안계측치의 조

■ Received: 2013. 4. 12. ■ Revised: 2013. 6. 19.

■ Accepted: 2013. 10. 1.

■ Address reprint requests to Jin Ho Jeong, MD, PhD
Department of Ophthalmology, Jeju National University
Hospital, #15 Aran 13-gil, Jeju 690-767, Korea
Tel: 82-64-717-1362, Fax: 82-64-717-1102
E-mail: amario@naver.com

합에서 굴절 예측치의 의미있는 차이가 발생하는지를 알아 보고, 그러한 경우에서 도수계산공식들의 정확성을 임상적으로 비교하고, 안계측치와 굴절예측치 차이 간에 수학적인 상관관계를 알아보고자 하였다.

대상과 방법

본 연구는 전향적 연구방식으로 이루어졌으며, 한명의 술자(JJ)에 의해 365안에 대하여 동일한 방법으로 백내장 수술이 시행되었다. 모든 참가자에 대하여 연구 참여 동의서를 받았으며, 연구 계획은 병원 윤리위원회의 승인(JIRB 2012-09-006-001)을 받았다. 수술 전 현성굴절검사를 시행하였고, 구면 대응치와 난시 크기를 기록하였다. 평균 각막곡률(mean keratometric power, K)은 자동각막곡률 측정기(ARK 9000, Nidek, Fremont, CA, USA)를 사용하여 측정하였으며, 해상도가 100 μ m인 접촉 초음파 측정기(OcuScan, Alcon, Fort Worth, TX, USA)를 사용하여 전방깊이(anterior chamber depth, ACD), 수정체 두께(lens thickness, LT), 안축장(axial length, AL)을 측정하였다. KAL 변수는 평균 각막 곡률(K)과 안축장(AL)의 곱으로 정의하였다. 수술전에 굴절교정 수술을 받았거나, 각막 흉터가 있는 경우, 수술 중 후낭과열 등의 합병증이 발생하였거나, 술후 창상 봉합을 한 경우에는 연구에서 제외되었다.

안축장과 각막곡률치를 기반으로 하여 초음파 측정기에 내장되어 있는 Hoffer Q 및 SRK/T 공식을 사용하여 인공수정체 도수가 계산되었다. 선택된 인공수정체 도수에 대하여 두 도수계산 공식 간의 술 후 굴절 예측치의 차이(expected disparity between formulas, EDF)를 계산하였다. EDF 변수는 선택된 인공수정체 도수에 대한 Hoffer Q 공식의 굴절 예측치에서 SRK/T 공식의 굴절 예측치를 뺀 값으로 정의하였다. Akreos adapt AO (Bausch & Lomb, Rochester, NY, USA) 인공수정체의 최적화 상수는 118.0을 사용하였다. 각막곡률과 안축장의 자료를 기반으로, 각각의 인공수정체 도수 공식에서 계산되는 유효 렌즈 위치(ELP)를 논문에 근거하여 엑셀 프로그램(Microsoft Excel; Microsoft, Redmond, WA, USA)을 사용하여 계산하였으며, Hoffer Q 공식에서 계산되는 ELP를 ACDh로 정의하고, SRK/T 공식에서 계산되는 ELP를 ACDt로 정의하였다.⁸⁻¹⁰

도수 계산공식의 술후 굴절 예측치에서 0.4 D의 차이는 일반적으로 인공수정체 도수의 0.5 D 차이에 상응한다는 것을 고려할 때, 도수 계산 공식들의 예측치가 0.4 D 이상 차이가 나는 경우는 인공수정체의 도수 선택에서 최소한 두 종류이상을 고려해야 한다는 것을 의미하므로, 연구에 참여한 365안은 계산된 EDF 값에 따라 세 군으로 분류되

었다(A: EDF > 0.4 D, B: $-0.4 D \leq EDF \leq 0.4 D$, C: EDF < $-0.4 D$). A군은 Hoffer Q 공식의 굴절 예상치가 SRK/T 공식의 굴절 예상치보다 0.4 디옵터(Diopter, D) 넘게 상대적으로 원시쪽으로 예측하는 경우에 해당되었으며, B군은 두 도수공식의 굴절 예상치의 차이가 0.4 D 이하인 경우, C군은 Hoffer Q 공식의 굴절 예상치가 SRK/T 공식의 굴절 예상치보다 0.4 D 넘게 상대적으로 근시쪽으로 예상하는 경우에 해당하였다.

수술전 각막 곡률을 측정하였으며, 수술시 각막 절개방향은 각막 곡률이 가장 높은 방향에서 2.75 mm의 투명각막 절개를 시행하였다. 수술 시 동공은 0.5% tropicamide와 0.5% phenylephrine 혼합 점안제(Midrin P, Santen, Osaka, Japan)를 사용하여 산동하였으며, Proparacaine hydrochloride 0.5% 점안제(Alcaine®, Alcon labs, TX, USA)를 사용하여 점안 마취를 시행하였다. 수술 중 전방유지 및 내피세포 보호를 위하여 1.0% sodium hyaluronate (Healon, LG life science, Seoul, Korea) 점탄물질을 사용하였다. 26게이지 주사바늘로 수정체 전낭을 천공한 다음 원형전낭절개용 포셉을 사용하여 5.5-6.0 mm의 원형 전낭 절개를 시행하였으며, Infiniti 시스템(Alcon, Fort Worth, TX, USA)을 사용하여 phaco-chop 방식으로 초음파 유효 수술을 시행한 다음, Akreos adapt AO (Bausch & Lomb, Rochester, NY) 인공수정체를 낭내 삽입하였다. 이후 점탄물질을 제거하였으며, 절개부위에 관류액으로 기질부위 수화를 시행하였고, 봉합은 시행하지 않은 상태에서 창상의 유출은 없음을 확인하고 수술을 종료하였다.

수술 후 6주가 되었을 때 수술안에 대하여 현성 굴절검사를 시행하였으며, 이를 바탕으로 각 도수계산공식의 굴절 예측치와 술후 실측치를 비교하여 각 도수 계산공식의 오차를 측정하였다.^{6,11} 도수 계산공식의 오차는 술절 굴절 예측치에서 현성 굴절검사 결과의 구면대응치를 뺀 값으로 정의하였으며, 오차의 절대치를 계산한 값들의 평균을 구하여 평균절대오차(MAE)로 정의하였다. 각각의 도수 계산 공식 간의 MAE를 *t*-test로 비교하여 도수계산공식들의 수술 후 정확도를 임상적으로 비교하였다. 통계분석은 SPSS 통계 분석 프로그램(version 12.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 사용하여 시행하였으며, 통계적으로 유의한 차이는 0.05 미만을 기준으로 하였다.

결 과

본 연구의 참가자들의 남녀 성비는 123:242였으며, 평균 나이는 70.7세였다. 안축장은 19.18 mm에서 31.47 mm까지 분포하였으며, 평균값은 23.40 mm였다(Fig. 1). 환자들은

Table 1. Characteristics of preoperative biometric data and the power of IOL distribution

	Minimum	Maximum	Mean \pm SD
Age (years)	40	91	71.09 \pm 8.99
Axial length (mm)	19.18	31.47	23.44 \pm 1.55
Spherical equivalent of refractive error (diopter)	-24.50	+10.50	-0.37 \pm 3.85
Cylinder of refractive error (diopter)	0	+3.50	1.17 \pm 0.73
Corneal curvature (diopter)	40.44	49.56	44.26 \pm 1.60
Anterior chamber depth (mm)	2.00	4.29	3.14 \pm 0.45
Power of IOL (diopter)	0.0	38.0	20.17 \pm 4.44

Table 2. Mean EDF* and the number of subgroups stratified by axial length

Subgroup	A*		B†		C‡	
Axial length	EDF	(N)	EDF	(N)	EDF	(N)
< 22 mm	-0.80 \pm 0.53	(9)	0.00 \pm 0.18	(41)	0.55 \pm 0.08	(4)
22-25 mm	-0.48 \pm 0.05	(10)	0.00 \pm 0.18	(242)	0.53 \pm 0.09	(24)
> 25 mm	-0.41 \pm 0.00	(1)	0.17 \pm 0.20	(17)	0.54 \pm 0.11	(17)
Total	-0.62 \pm 0.39	(20)	0.00 \pm 0.19	(300)	0.53 \pm 0.10	(45)

Values are presented as mean \pm SD.

EDF = expected disparity between formulas.

*EDF > 0.4 D; †-0.4 D \leq EDF \leq 0.4 D; ‡EDF < -0.4 D.

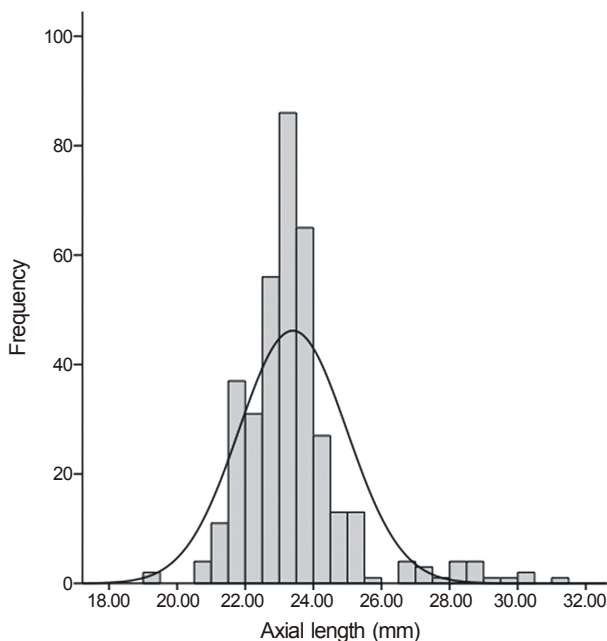


Figure 1. Distribution frequency was illustrated in histogram with normal distribution curve. In histogram, 37 cases (12.1%) had axial length shorter than 22 mm, and 239 cases (78.3%) ranged between 22 and 25 mm, and 29 cases (9.5%) were longer than 25 mm.

의 수술전 굴절력, 각막곡률(K), 전방깊이(ACD), 수정체 두께(LT), 그리고 사용된 인공수정체 도수의 평균값은 Table 1에 요약되었다. EDF의 평균값은 -0.03 ± 0.31 D였으며, 최소값은 -0.85 D였고, 최대값은 1.86 D였다.

각막 곡률과 안축장의 상관관계를 산점도로 나타내었으며(Fig. 2), 여기서 참가군을 EDF 값에 따라 3개의 하위군

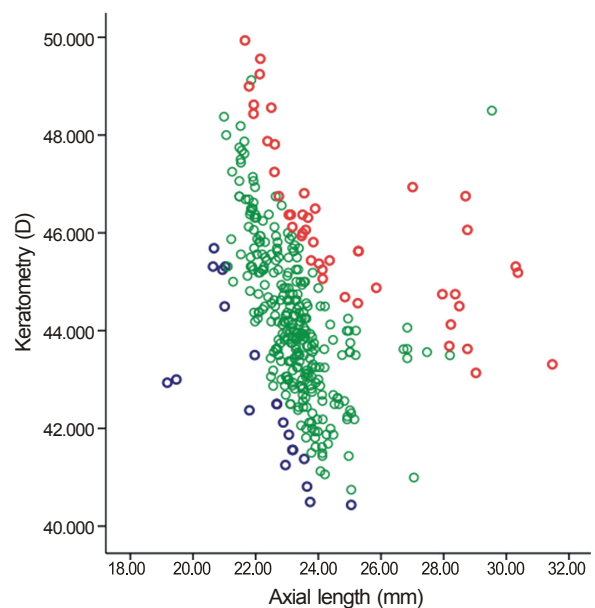


Figure 2. For the selected IOL power, the disparity between the 2 formulas (expected disparity between formulas, EDF) was calculated by subtracting the expected refraction value obtained using the SRK/T formula from that obtained using the Hoffer Q formula. The 365 cases were divided into 3 groups according to their EDF value (A: EDF > 0.4 D, B: -0.4 D \leq EDF \leq 0.4 D, C: EDF < -0.4 D). The scatterplot of the corneal curvatures and axial lengths showed clear discrimination among the EDF subgroups. EDF subgroup A (red circle), B (green circle), C (blue circle).

으로 나누었을 때, 대부분의 경우(82.2%)에서는 두 도수계산 공식간의 굴절예측치의 차이가 0.4 D 이하인 경우(B군)에 속하였고, 두 공식간의 예측치의 차이가 0.4 D 보다 큰 경

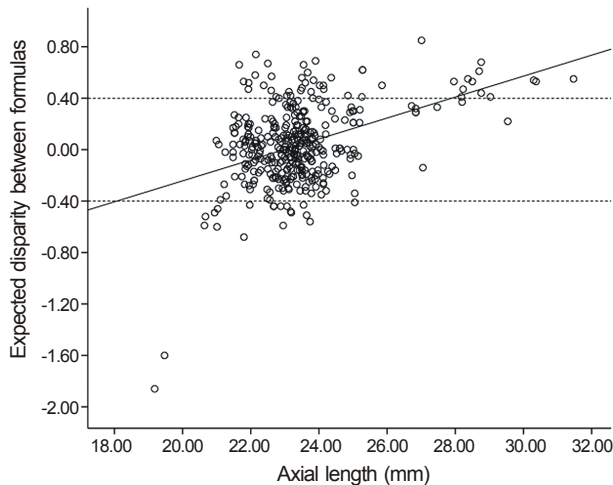


Figure 3. The EDF values were plotted against the axial length, and showed an R value of 0.417, by using a linear regression model ($p = 0.000$). The EDF values show large amplitude of variation even in middle axial length range (22-25 mm). *EDF (expected disparity between formulas) was calculated by subtracting the expected refraction value obtained using the SRK/T formula from that obtained using the Hoffer Q formula.

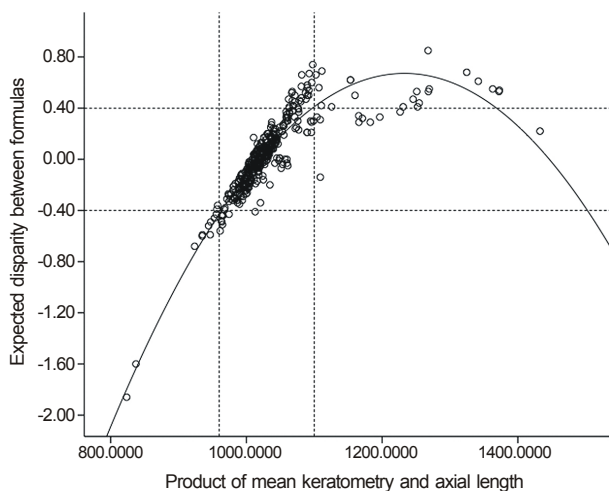


Figure 4. The EDF* values were plotted against the products of corneal curvature and axial length, and showed an r^2 value of 0.855, by using a quadratic curve estimation ($p = 0.000$). *EDF (expected disparity between formulas) was calculated by subtracting the expected refraction value obtained using the SRK/T formula from that obtained using the Hoffer Q formula.

우(A 또는 C군)에 속하는 경우는 17.8%였다. 대상을 안축장의 길이에 따라 3군으로 구분하고, 이를 다시 EDF값에 따라 세분화하게 되었을 때, 중간 안축장(22-25 mm) 군에서는 A 또는 C군에 분포하는 경우가 12.2%였으나, 짧은 안축장(<22 mm) 군에서는 24.1%였고, 긴 안축장(>25 mm) 군에서는 51.8%로 증가하는 양상을 나타내었다(Table 2).

EDF를 유발하는 생체계측인자들과의 관련성을 알아보고자 이변량 상관분석을 시행하였을 때, EDF는 AL ($r=0.417$, $p=0.000$)보다는 K ($r=0.594$, $p=0.000$)와 더 높은 상관관계를 나타내었다(Fig. 3). EDF는 K와 AL의 곱으로 정의된 변수 KAL에 대해 2차항 모형 곡선추정 분석(quadratic curve estimation)을 시행하였을 때 매우 높은 상관관계를 보였다($r^2=0.855$, $p=0.000$) (Fig. 4).

Hoffer Q공식의 유효 렌즈 위치(ELP)인 ACDh와 SRK/T 공식의 ELP인 ACDt의 평균값은 각각 5.05 ± 0.44 와 5.10 ± 0.61 로 매우 유사한 수치를 나타내었으며, 생체계측인자들과의 이변량 상관분석을 시행하였을 때, ACDh는 K ($r=-0.048$, $p=0.360$) 보다는 AL ($r=0.914$, $p=0.000$) 및 KAL ($r=0.898$, $p=0.000$)와 유의한 상관관계를 나타내었고, ACDt는 K ($r=0.276$, $p=0.000$), AL ($r=0.777$, $p=0.000$), 그리고 KAL ($r=0.950$, $p=0.000$) 모두와 유의한 상관관계를 나타내었다. 술전 측정된 ACD는 K ($r=-0.037$, $p=0.482$) 보다는 AL ($r=0.506$, $p=0.000$)와 유의한 상관관계를 나타내었다(Table 3).

수술 후 계산된 각 도수계산공식의 오차와 술전 생체계측 인자와의 인과관계를 알아보기 위하여 다중회귀분석(multiple regression analyses)을 시행한 결과를 Table 4에 요약하였다. Hoffer Q 공식의 수술 후 오차는 각막 난시($p=0.000$), 전방깊이($p=0.000$), 그리고 수정체 두께($p=0.005$)와 관련이 있었다. SRK/T 공식의 수술 후 오차는 각막 난시($p=0.000$), 전방깊이($p=0.000$), 수정체 두께($p=0.004$), 그리고 EDF ($p=0.014$)와 관련이 있었다.

수술 후 절대오차의 평균값(MAE)은 Hoffer Q 공식의 경우 0.45 ± 0.31 D (A군), 0.29 ± 0.23 D (B군), 그리고 0.41 ± 0.33 D (C군)이었고, SRK/T 공식의 경우 0.42 ± 0.38 D (A군), 0.27 ± 0.23 D (B군), 그리고 0.42 ± 0.38 D (C군)이었다. 두 공식의 MAE를 paired t -test로 검정하

Table 3. The composition of Hoffer Q and SRK/T formula and Pearson correlation with biometric factors

Composition	Mean \pm SD	Correlation (sig)	K	AL	KAL [‡]
ACDh*	5.05 ± 0.44		-0.048 (0.360)	0.914 (0.000)	0.898 (0.000)
ACDt [†]	5.10 ± 0.61		0.276 (0.000)	0.777 (0.000)	0.950 (0.000)
ACD	3.13 ± 0.45		-0.037 (0.482)	0.506 (0.000)	0.491 (0.000)

SD = standard deviation.

*Effective lens position of Hoffer Q formula; [†]Effective lens position of SRK/T formula; [‡]Defined as the product of mean corneal power (K) and axial length (AL).

Table 4. The results of multiple regression analyses of Hoffer Q and SRK/T formula error against the preoperative biometric measurements with EDF

Adjusted R ²	Error of Hoffer Q formula	Error of SRK/T formula
	0.272	0.225
Significance		
Mean keratometry	0.379	0.332
Astigmatism	0.000*	0.000*
Axial length	0.485	0.494
Anterior chamber depth	0.000*	0.000*
Lens thickness	0.005*	0.004*
EPL difference	0.066	0.072
Emmetropic power difference	0.215	0.160
EDF	0.278	0.014*

*Statistically significant.

Table 5. Comparison of IOL formula accuracy using MAE amount

1) Mean absolute error (MAE) comparison between both formulae stratified by EDF* subgroup using paired *t*-test

Group	MAE of Hoffer Q	MAE of SRK-T	N	Sig. (2-tailed)
A*	0.45 ± 0.31 D	0.42 ± 0.38 D	20	0.534
B†	0.29 ± 0.23 D	0.27 ± 0.23 D	300	0.149
C‡	0.41 ± 0.33 D	0.42 ± 0.38 D	45	0.784

2) Mean absolute error (MAE) comparison between both formulae stratified by axial length using paired *t*-test

Axial length	MAE of Hoffer Q	MAE of SRK-T	N	Sig. (2-tailed)
< 22 mm	0.33 ± 0.26 D	0.35 ± 0.31 D	54	0.866
22-25 mm	0.29 ± 0.23 D	0.27 ± 0.23 D	276	0.155
> 25 mm	0.50 ± 0.36 D	0.44 ± 0.41 D	35	0.447

3) Percentage of eyes within 0.50 D, within 1.00 D or over 1.00 D of mean absolute errors (MAE) was calculated to compare the accuracy of formula

MAE of formula	<0.50 D	≤1.00 D	>1.00 D
Hoffer Q formula	295 (80.8%)	358 (98.1%)	7 (1.9%)
SRK/T formula	294 (80.5%)	359 (98.4%)	6 (1.6%)

Values are presented as mean ± SD.

EDF = expected disparity between formulas.

*EDF > 0.4 D; †-0.4 D ≤ EDF ≤ 0.4 D; ‡EDF < -0.4 D.

였을 때, 각각의 EDF 군에서 두 공식은 유의한 차이를 나타내지 않았다(Table 5). 두 군에서 MAE가 1.0 D 이내로 나타나는 경우는 Hoffer Q 공식에서 98.1%였고, SRK/T 군에서 98.4%였다.

고 찰

인공수정체 도수계산공식들을 비교한 기존의 논문들은 공식들의 정확성을 비교하기 위하여 대상안을 안축장의 길이에 따라 하위군으로 분류하고, 각각의 안축장 군에서 MAE를 비교하는 방법을 통상적으로 사용해왔다.^{4,12-14} 여러 연구에서 Hoffer Q 공식은 안축장이 짧은 경우에서 우수한 정확성을 나타내었고, SRK/T공식과 Haigis 공식은 긴 안축장을 가지는 경우에서 높은 정확도를 보여주는 것으로 보고된 바 있으며, 22-25 mm 사이의 중간 안축장을 가지

는 경우에는 모든 도수 계산공식들이 매우 정확한 결과를 나타내는 것으로 알려졌다.^{1,4,15,16} 그렇다면 중간 안축장에서는 여러 가지 도수 계산 공식들간에 예측치의 차이가 거의 없을 것으로 추정해볼 수 있지만, 본 연구에서 나타난 바와 같이 중간 안축장 군에서도 12.2% (278안 가운데 34안)에서는 Hoffer Q 공식과 SRK/T공식의 예측치가 0.4 D 이상 차이가 난다는 것이 밝혀졌다. 도수 계산공식의 술후 굴절 예측치에서 0.4 D의 차이는 일반적으로 인공수정체 도수의 0.5 D 차이에 상응한다는 것을 고려할 때, 도수 계산 공식들의 예측치가 0.4 D 이상 차이가 나는 경우는 인공수정체의 도수 선택에서 최소한 두 종류 이상을 고려해야 한다는 것을 의미한다. 안축장이 25 mm 보다 긴 군에서는 EDF의 절대값이 0.4보다 큰 경우가 51.8%로 매우 높은 빈도를 보여주었으며, 안축장이 22 mm보다 짧은 군에서 A군에 속하는 경우 평균 EDF값이 -0.803 D로 두 공식간의 예

측치의 차이가 매우 증가하는 경향을 나타내었으며, 안축장이 19.18 mm이고 평균 각막곡률이 42.94 D인 경우에는 Hoffer Q 공식과 SRK/T 공식의 EDF가 최대 1.86 D까지 증가하는 것으로 나타났다. Lee et al¹⁷이 보고한 바와 같이 SRK/T 공식에서 안축장이 짧을 때 원시화 경향이 커지는 양상을 확인할 수 있었다. 안축장 길어질 수록 두 공식간의 예측치가 서로 차이가 나는 빈도는 증가하지만, 예측치 차이 자체는 크게 증가하지 않는 반면, 안축장이 짧아질수록 두 공식간의 예측치 차이가 매우 증가하는 것을 확인하였다(Fig. 3).

유효렌즈위치(ELP)의 계산은 인공수정체 도수계산의 가장 중요한 부분중 하나이다.^{11,18} SRK/T 공식은 술후 전방깊이의 계산에 있어 Fedorov 각막 높이 방정식을 사용하지만, Hoffer Q 공식에서는 Hoffer⁸이 자체적으로 개발한 각막 곡률의 탄젠트값을 이용하는 방법을 사용한다.⁹ 본 연구에서 저자들은 두 도수계산공식에서 계산된 ELP값의 평균 값을 구하고, ELP와 각막곡률, 안축장, 그리고 KAL과의 상관관계를 계산하였으며, 그 결과 Hoffer Q 공식의 ELP는 안축장과 가장 높은 상관관계($r=0.904$)를 나타내었으며, SRK/T 공식의 ELP는 KAL과 가장 높은 상관관계($r=0.937$)를 보여, 도수 계산공식에서 계산되는 ELP와 생체계측인자들에 대한 상관성의 차이가 도수 계산공식 간의 예측치 차이를 유발하는 것으로 보인다. Table 3에서 볼 때, 실제 측정된 술전 전방깊이는 각막곡률과는 유의한 상관성을 보이지 않고, 안축장과는 통계적으로 유의한 상관관계를 나타내었는데, 술후 ELP의 계산에 있어, SRK/T 공식 보다는 Hoffer Q 공식의 ELP가 수술전 실측된 전방깊이의 경향성과 유사한 양상을 나타내었다.

도수 계산공식간의 예측치의 차이를 유발하는 생체계측 인자 가운데 가장 상관성이 높은 변수는 KAL ($r=0.750$)이었다. 각막 곡률과 안축장 가운데에서는 각막곡률($r=0.593$)이 안축장($r=0.412$) 보다 EDF를 유발하는 데에 있어 더 높은 상관성을 나타내었다. Fig. 2의 산포도를 보면 안축장에 대한 각막곡률의 비율이 EDF를 유발하는 가장 중요한 인자임을 알 수 있다. 기존의 연구에서는 도수계산공식의 정확도를 결정하는 요인으로 안축장을 중요하게 생각해 왔으나, 본 연구에서는 안축장이나 각막곡률 자체보다는, 해당 안축장에서 기대되는 각막곡률에서 벗어나 있는 정도가 EDF 생성의 가장 중요한 원인이 된다고 판단하였고, 각막곡률-안축장 회귀곡선이 반비례 곡선과 유사한 양상을 나타냄을 고려할 때, 각막곡률-안축장 회귀곡선에서 이탈하는 정도를 가장 잘 반영하는 것은 KAL 변수라고 판단하였다. Fig. 4에서 나타나듯이, KAL과 EDF의 상관관계를 이차항 곡선 추정 분석(quadratic curve estimation analysis)을 시행하여 매우 높은 상관관계($R^2=0.855$)를 얻을 수 있

었으며, 두 도수계산 공식의 예측치가 서로 0.4 D 넘게 차이가 나는 경우는, KAL이 960 보다 작거나, KAL이 1100 보다 큰 경우와 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 예를 들어, 안축장이 22 mm이고 각막곡률이 43.64 D인 경우 KAL은 960인데, 일반적인 각막곡률-안축장 회귀곡선에서 안축장이 22 mm인 경우 각막곡률은 45 D에서 47 D 사이에 대부분 분포하므로, 안축장이 그보다 짧은 경우라도 각막곡률이 각막곡률-안축장 회귀곡선에 상응하게 되면 KAL은 960과 1100 사이에 존재하게 되고, 두 도수공식의 예측치 차이는 0.4 D 이하로 나타날 가능성이 높다. 반대로 일반적인 각막곡률-안축장 회귀곡선을 벗어나는 조합에서는 KAL이 960에서 1100의 범위를 벗어나, 도수 계산공식 간에 예측치의 차이가 증가할 것으로 예측할 수 있다. 이와 같이 안축장과 이에 따라 예상되는 각막곡률을 같이 고려하는 2차원적인 접근방법은 기존의 안축장에 따른 1차원적 분류 방법보다 좀더 유용할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 도수 계산공식의 이론적인 비교방법과 함께 수술 후 굴절 오차 측정방법에 따른 임상적인 비교 결과에 대하여서도 분석하였다. 각 도구 계산공식들의 수술 후 오차에 대한 술전 생체 계측인자의 영향을 파악하기 위하여 다중 회귀분석 방법을 시행한 결과, 각막 난시, 전방깊이, 수정체 두께가 두 공식 모두에서 통계적으로 유의한 상관 인자로 파악되었고, 각 도수 계산공식 간의 예측치 차이(EDF)는 SRK/T 공식에서만 유의한 상관 인자로 나타났다(Table 4). EDF가 Hoffer Q 공식의 술후 오차와 연관성이 없고 SRK/T 공식에서 유의한 상관성을 나타낸 것은, 환자군 가운데 EDF가 -0.8 이상 차이난 일부 군에서 Hoffer Q 공식의 예측도가 좀더 정확하였기 때문으로 판단된다. 이는 본 연구에서 두 도수 계산공식의 예측치 차이(EDF)를 유발하는 원인을 확인하였지만, EDF 자체가 도수 계산공식의 정확도를 예측하는 인자로 사용되기에는 무리가 있음을 보여준다. 다중 회귀분석 결과에서 EDF의 상관성보다는 각막 난시, 전방깊이 및 수정체 두께가 각 도수 계산공식의 술후 오차와 더욱 높은 상관성을 보여주었는데, 각막 난시나 전방깊이, 또는 수정체 두께는 술전 생체계측에는 포함되지만, Hoffer Q 공식이나 SRK/T 공식에 실제로 사용되지는 않는 변수이다. 이는 도수 계산공식의 정확도에 영향을 미치는 강력한 변수들이 도수 계산공식에 포함되지 않는 인자들에 있기 때문에, 근본적으로 두 도수 계산공식의 정확도를 향상시키는 것에 한계가 있다는 것을 의미하며, 4세대 도수 계산 공식인 Haigis 공식이 실측된 전방 깊이를 직접 도수 계산공식에 사용하여 계산의 정확도를 향상시킬 수 있었던 것과 일맥상통한다. 그러나 Haigis 공식에 이용되는 레이저 간섭 측정기인 IOL master는 수정체 두

계를 측정할 수 없다는 단점이 있고, Haigis 계산공식에는 수정체 두께가 변수로 사용되지 않는다.¹ 비교적 최근에 개발된 Holliday 2 공식이나 Olsen 공식에는 수정체 두께 또한 도수 계산 공식에 변수로 사용되고 있어, 좀더 도수 계산 공식의 정확도를 개선할 수 있을 것으로 기대되고 있다.^{3,13}

본 연구에서 도수 계산공식의 MAE를 계산하여 도수 계산공식의 정확도를 비교한 결과, 두 도수계산공식들의 정확도에는 통계적으로 유의한 차이가 없었으며, 이는 안축장을 3군으로 세분하여 분석하였을 때도 마찬가지로 결과를 보여주었다(Table 5). 생체 계측인자가 어떻게 두 도수 계산공식의 예측치 차이 발생에 관여하는가에 대한 이론적인 분석에는 모든 경우의 조합이 고려될 수 있기 때문에 초음파 측정의 정확도나 해상도가 문제가 되지 않지만, 임상적으로 수술 후 도수 계산공식의 정확도를 현성굴절검사로 검증할 때는 초음파 안 측정기가 레이저 간섭 측정방법보다 낮은 해상도가 측정의 정확도를 떨어뜨릴 수 있다. 레이저 간섭 측정방식은 안 초음파 측정방법보다 대략 5배의 정밀도를 나타낸다.¹ 안 초음파 측정방식의 해상도는 0.1 mm이며, 이는 정상 안축장에서 0.3 D의 오차에 해당하여 인공수정체 도수 선택에 부정확한 영향을 끼칠 수 있고, 이는 결과적으로 본 연구의 약점으로 작용하였다. 또한 본 연구는 대상 모두를 판형 인공수정체(plate-haptic IOL)를 사용하였기 때문에, 개방형 지지부 인공수정체(open-loop IOL)를 사용한 기존의 연구와 비교할 때 참고해야 한다.

결론적으로 본 연구에서는 Hoffer Q 공식과 SRK/T 공식의 비교에 있어, 두 도수 계산공식의 예측치 차이를 유발하는 인자에 대한 이론적인 분석과 함께, 공식의 실제 술후 오차 정도를 비교하는 임상적인 분석을 동시에 시행하였다. 두 도수 계산공식은 정확한 인공수정체 도수를 예측하는데 있어 전반적으로 매우 우수하였다. 비록 환자군의 17.8%에서는 도수 계산공식 간의 예측치가 0.4 D 넘게 차이가 발견되었고, 예측치의 차이가 많은 군에서 술후 오차 역시 증가하는 경향을 나타내었지만, 많은 경우에 있어 안축장이 짧거나 긴 군에서 나타났고, 그러한 경우 술전 굴절력이 원시나 근시인 경우가 많아서, 수술후 굴절력에 대부분 잘 적응하였다. 본 연구에서는 두 도수 계산공식의 예측치가 차이가 나는 생체계측인자의 조합을 확인할 수 있었으며, 공식간의 예측치 차이는 각막곡률과 안축장의 곱과 매우 높은 상관관계를 나타내었다. 그러나 임상적으로 두 도수 계산공식의 수술 후 오차 정도는 공식간의 예측치 차이보다는 각막 난시나 전방깊이, 또는 수정체 두께와 같이 Hoffer Q 공식이나 SRK/T 공식의 계산에 포함되지 않는 인자의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타나, 추후 이를 반영하는

새로운 도수 계산공식이 개발되어 도수 계산공식의 정확도를 향상 시켜주기를 기대한다.

REFERENCES

- 1) Lee AC, Qazi MA, Pepose JS. Biometry and intraocular lens power calculation. *Curr Opin Ophthalmol* 2008;19:13-7.
- 2) Eibschitz-Tsimhoni M, Archer SM, Del Monte MA. Intraocular lens power calculation in children. *Surv Ophthalmol* 2007;52:474-82.
- 3) Olsen T. Calculation of intraocular lens power: a review. *Acta Ophthalmol Scand* 2007;85:472-85.
- 4) Aristodemou P, Knox Cartwright NE, Sparrow JM, Johnston RL. Formula choice: Hoffer Q, Holladay 1, or SRK/T and refractive outcomes in 8108 eyes after cataract surgery with biometry by partial coherence interferometry. *J Cataract Refract Surg* 2011;37:63-71.
- 5) Gavin EA, Hammond CJ. Intraocular lens power calculation in short eyes. *Eye (Lond)* 2008;22:935-8.
- 6) Narváez J, Zimmerman G, Stulting RD, Chang DH. Accuracy of intraocular lens power prediction using the Hoffer Q, Holladay 1, Holladay 2, and SRK/T formulas. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:2050-3.
- 7) Eibschitz-Tsimhoni M, Tsimhoni O, Archer SM, Del Monte MA. Discrepancies between intraocular lens implant power prediction formulas in pediatric patients. *Ophthalmology* 2007;114:383-6.
- 8) Hoffer KJ. The Hoffer Q formula: a comparison of theoretic and regression formulas. *J Cataract Refract Surg* 1993;19:700-12.
- 9) Retzlaff JA, Sanders DR, Kraff MC. Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula. *J Cataract Refract Surg* 1990;16:333-40.
- 10) Seo JM, Lee JH. The usefulness of the PCL power calculation computer program. *J Korean Ophthalmol Soc* 2002;43:23-8.
- 11) Dooley I, Charalampidou S, Nolan J, et al. Estimation of effective lens position using a method independent of preoperative keratometry readings. *J Cataract Refract Surg* 2011;37:506-12.
- 12) Bang S, Edell E, Yu Q, et al. Accuracy of intraocular lens calculations using the IOLMaster in eyes with long axial length and a comparison of various formulas. *Ophthalmology* 2011;118:503-6.
- 13) Sahin A, Hamrah P. Clinically relevant biometry. *Curr Opin Ophthalmol* 2012;23:47-53.
- 14) Fam HB, Lim KL. Improving refractive outcomes at extreme axial lengths with the IOLMaster: the optical axial length and keratometric transformation. *Br J Ophthalmol* 2009;93:678-83.
- 15) Nihalani BR, VanderVeen DK. Comparison of intraocular lens power calculation formulae in pediatric eyes. *Ophthalmology* 2010;117:1493-9.
- 16) Kim DY, Kim MJ, Kim JY, Tchah H. Comparison of formulas for intraocular lens power calculation installed in a partial coherence interferometer. *J Korean Ophthalmol Soc* 2009;50:523-8.
- 17) Lee YE, Choi KR, Jun RM. Accuracy of intraocular lens power calculations according to the formulas and anterior chamber depth in short eyes. *J Korean Ophthalmol Soc* 2010;51:1338-44.
- 18) Kekunnaya R, Gupta A, Sachdeva V, et al. Accuracy of intraocular lens power calculation formulae in children less than two years. *Am J Ophthalmol* 2012;154:13-19.e2.

=ABSTRACT=

Theoretical and Clinical Comparison of the Hoffer Q and SRK/T Formulas

Jin Ho Jeong, MD, PhD, Sung Gon Kim, MD, Hye Jin Lee, MD, Sun Ho Lee, MD, Dong Min Cha, MD

Department of Ophthalmology, Jeju National University School of Medicine, Jeju, Korea

Purpose: To evaluate the biometric conditions causing increased disparity in the calculation of intraocular lens (IOL) power between the Hoffer Q and SRK/T formulas.

Methods: A prospective comparative study was conducted on 365 uneventful, cataract surgeries performed at a tertiary care center by one surgeon. The IOL power was calculated using both the Hoffer Q and SRK/T formulas with A-scan biometry. For a selected IOL power, the expected disparity between the 2 formulas (EDF) was measured and the EDF value was used to categorize the cases. The resultant error associated with each formula was determined at postoperative 6 weeks. KAL was defined as the product of mean corneal power (K) and axial length (AL). Postoperative errors of both formulas were calculated and their association with preoperative biometry measurements analyzed.

Results: In 17.8% of the cases, the EDF was larger than 0.4 D, possibly leading to different IOL diopter recommendations. The EDF value and the product of corneal curvature and axial length were significantly correlated ($R^2 = 0.855$, $p < 0.001$). Multiple regression analysis of causative preoperative biometric factors on the postoperative formula errors showed that astigmatism, anterior chamber depth (ACD), and lens thickness (LT) were significantly associated with Hoffer Q error and SRK/T error.

Conclusions: Overall, both formulas performed very well when recommending the correct IOL power. The cause of disparity between the predicted refraction for the 2 formulas was more associated with KAL than K or AL alone. Astigmatism, ACD, and LT were the causative factors for the postoperative errors in both formulas.

J Korean Ophthalmol Soc 2014;55(1):85-92

Key Words: Effective lens position, Hoffer Q formula, IOL formula comparison, SRK/T formula

Address reprint requests to **Jin Ho Jeong, MD, PhD**
Department of Ophthalmology, Jeju National University Hospital
#15 Aran 13-gil, Jeju 690-767, Korea
Tel: 82-64-717-1362, Fax: 82-64-717-1102, E-mail: amario@naver.com