

# Clinical Application of Eye Tracker in Pursuit Eye Movements

Byeong-Yeon Moon<sup>a</sup>, Hyun Gug Cho<sup>b</sup>, Sang-Yeob Kim<sup>c</sup>, and Dong-Sik Yu<sup>d,\*</sup>

Dept. of Optometry, Kangwon National University, Professor, Samcheok 25949, Korea

(Received July 25, 2023: Revised August 8, 2023: Accepted August 8, 2023)

**Purpose:** This study evaluated the feasibility of clinical application of an eye tracker in pursuit eye movements test. **Methods:** Twenty-five subjects (mean age, 21.04±1.67 years) with normal phoria were included. Pursuit eye movements in horizontal, vertical, and diagonal directions using the Clinical Eye Tracker were measured, and analyzed by calculating bivariate contour ellipse area (BCEA) and standard deviation (SD) area. Pursuit eye movements were evaluated based on 40 deg(°) of the range of the moving target. **Results:** Pursuit eye movements were from 58.42 deg<sup>2</sup> for the vertical direction to 100.60 deg<sup>2</sup> for the left diagonal direction in the evaluation by the BCEA, and from 42.45 deg<sup>2</sup> for the horizontal direction to 81.57 deg<sup>2</sup> for the left diagonal direction by the SD area. In the relative comparison, the evaluation by the BCEA and SD area showed overestimation and underestimation, respectively. The Spearman's correlation coefficients between BCEAs and SD areas ranged from 0.665 for the left diagonal direction to 0.993 for the vertical direction. In both evaluations, the horizontal and vertical directions were more stable and accurate than diagonal directions. **Conclusions:** This study demonstrated the feasibility of evaluating pursuit eye movements based on the BCEA and SD area in several directions using the eye tracker for subjects with normal phoria.

**Key words:** Pursuit eye movement, Eye tracker, Bivariate contour ellipse area (BCEA), Standard deviation area, Phoria

## 서 론

안구운동(ocular motor) 평가는 주시 안정성(fixation stability), 충동안구운동(saccadic eye movements)과 추적안구운동(pursuit eye movements)을 포함한다.<sup>[1]</sup> 추적안구운동은 움직이는 물체를 가까이 따라볼 수 있는지를 평가하는 것으로 외안근의 장애 유무나 중추신경계의 결합 유무와 관련된 정보를 제공하는 중요한 임상 자료이다.<sup>[2]</sup> 옥토메트리 분야에서 추적안구운동 평가 방법은 눈을 직접 관찰하거나 NSUCO(Northeastern State University College of Optometry) 안구운동검사로 할 수 있다.<sup>[1,3]</sup> 그러나 이러한 방법들은 간단하나 정량적 정보보다 정성적 정보를 주로 평가하는 것으로 실무자에 따라 다른 방식으로 해석될 수 있다.<sup>[1]</sup> 최근에는 다양한 아이트래커(eye tracker)를 이용하거나 기계학습(machine learning) 기술이 적용되는 디지털카메라를 사용하여 안구운동을 평가하고 있다.<sup>[4-6]</sup>

아이트래커를 이용한 연구는 의학 분야에서 광범위하게 진행되고 있다.<sup>[7,8]</sup> 아이트래커에 의한 추적안구운동의 임상 적용은 경추 장애의 타각적 평가나 외상성뇌손상과 관련된 질환 중심으로 평가하고 있으며,<sup>[4,9-11]</sup> 또한 비사시성

양안시이상(non-strabismic vision anomalies)에도 적용하고 있다.<sup>[12-14]</sup> 우리는 지난 연구에서 아이트래커를 이용한 주시 안정성 평가에 관한 연구를 발표하였고,<sup>[15,16]</sup> 이를 확장하여 여러 임상 검사에 아이트래커의 적용이 가능할 것으로 생각한다. 옥토메트리 분야의 임상 검사에서 추적안구운동은 주로 검사자의 주관적인 관찰로 평가하므로 객관성이 부족한 측면이 있다.

따라서 비사시성 양안시이상 평가에서 추적안구운동 평가는 신뢰도를 높이고, 주관적 평가를 배제하기 위해 타각적 평가 방법으로 모색할 필요성이 있다고 본다. 본 연구는 이러한 관점에서 정상 범위의 사위를 가진 대상자를 중심으로 아이트래커를 이용한 추적안구운동의 임상 적용의 가능성을 찾고자 하였다.

## 대상 및 방법

### 1. 대상자

대상자는 눈 질환이 없으며, 원거리(6 m) 사위가 정위에서 2 △ 외사위, 근거리(40 cm) 사위가 정위에서 6 △ 외사위의 정상 범위이며, 평상시의 습관대로 안경 또는 콘택

\*Corresponding author: Dong-Sik Yu, TEL: +82-33-540-3415, E-mail: yds@kangwon.ac.kr

Authors ORCID: <sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0003-0645-4938>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0002-8267-3801>, <sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0001-6806-3305>, <sup>d</sup><https://orcid.org/0000-0002-4387-4408>

트렌즈 착용 상태이거나 미착용 상태에서 시력은 0.7에서 1.2로 25명(남 13명, 여 12명, 평균 21.04±1.67세)이었다. 시력은 투영시력표(ACP-8, Topcon, Japan)로 측정하였고, 교정 안경렌즈나 콘택트렌즈의 굴절력은 렌즈미터(LM-15, Topcon, Japan)로 측정하였다. 원거리와 근거리의 사위는 프리즘 바(HB 16, Astron International, USA)를 이용하여 측정하였고 외사위와 내사위는 각각 음과 양의 부호를 표기하였다. 이 연구는 강원대학교 생명윤리위원회로부터 승인(KWNUIRB-2023-02-007-001)을 받아 진행하였다.

## 2. 추적안구운동 측정 장비 및 설정

추적안구운동 평가는 Tobii Eye Tracker(Tobii eyeX, Tobii Technology, Sweden) 기반의 Clinical Eye Tracker (Version 18.04, Thomson Software Solutions, UK)<sup>[15,17,18]</sup>를 이용하였다. 이 장비는 검사자가 제어할 수 있는 26인치 화면(control monitor)과 피검사가 타깃을 볼 수 있는 27인치 LCD(1920×1080 pixels, LG, Korea) 화면으로 구성하였다.

피검사와 화면 사이의 거리는 550 mm이며, 피검사의 시선이 화면 중앙을 보도록 턱과 이마받이가 있는 고정장치를 이용하여 조절하였다. 타깃의 크기는 약 0.22 시력에 해당하는 3.7 mm 직경의 적색 원형으로 검은색 배경 화면에 나타나도록 하였다. 추적안구운동의 방향은 정중앙을 기점으로 9개 방향의 지점(중앙, 상방, 하방, 오른쪽, 왼쪽, 우상, 좌상, 우하, 좌하)을 지나는 이동 방향(수평 방향: 중앙-왼쪽-중앙-오른쪽-중앙, 수직 방향: 중앙-상방-중앙-하방-중앙, 왼쪽 대각선 방향: 중앙-좌상-중앙-우하-중앙, 오른쪽 대각선 방향: 중앙-우상-중앙-좌하-중앙)으로 평가하였다. 27인치 화면 기준에서 타깃이 최대한 이동할 수 있는 크기는 수평과 대각선 방향에서 각각 40 deg(°), 수직 방향에서 30 deg로 하였고, 타깃의 이동 속도는 25~40 deg/sec<sup>[19]</sup>보다 느린 9~10 deg/sec로 하였다. 추적안구운동은 9개 방향을 중심으로 타깃이 연속적으로 움직이는 32.5 sec 동안에 이루어지도록 하였고, 각 방향의 자료 수집을 위해 수평 방향은 이동하기 전에서 1 sec 지연, 수직과 대각선 방향은 이동하기 전에 0.5 sec 지연하도록 하였고, 각각의 지연시간은 데이터 수집에서 제외하였다.

## 3. 추적안구운동 측정과 데이터 추출

Clinical Eye Tracker의 제어 화면을 실행시켜 각 피검사의 눈에 맞도록 툴바(toolbar)에 있는 'Calibrate'을 조정하였다. 'Stimulus'를 작동시켜 앞에서 설정한 추적안구운동의 타깃이 나타나도록 한 다음 양안주시 툴바 'Binoc'를 작동시킨 후 'Record'를 실행하였다. 기록된 데이터는 엑셀 파일로 전환하였고 각 방향의 데이터를 해당되는 추적

안구운동을 추출하였다. 추출한 데이터는 수평(x-축)과 수직(y-축)의 주시 위치와 시간으로 구성되어 있다.

## 4. 추적안구운동 평가 방법

추출한 데이터에서 수평과 수직 방향의 추적안구운동은 x-축과 y-축에서의 산포도 즉, 표준편차(standard deviation, SD)는 쉽게 파악할 수 있지만 대각선 방향의 추적안구운동은 x와 y-축에서의 표준편차를 쉽게 평가할 수 없다. 따라서 대각선 방향은 표준편차를 결정하기 위해 왼쪽 대각선 방향을 반시계방향으로 45 deg, 오른쪽 대각선 방향을 시계방향으로 45 deg 회전시켜 x와 y-축으로 평가하였다.

추적안구운동 평가는 표준편차 기반으로 2가지 방법으로 평가하였다. 첫째 방법은 추적안구운동이 다양한 방향으로 진행되더라도 x와 y축 좌표로 이루어진 미세한 변동으로 표현할 수 있다. 이러한 변동성은 확률변수로 나타낼 수 있으며 이를 x와 y축의 표준편차로 표현할 수 있다. 이렇게 표현한 형태는 타원의 면적으로 평가할 수 있다. 식(1)과 같이 길이(length)와 폭(width)으로 이루어진 타원의 면적인 BCEA(bivariate contour ellipse area)<sup>[20]</sup>로 평가하였다.

$$BCEA=2k\pi\sigma_h\sigma_v(1-\rho^2)^{1/2} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_h$ 와  $\sigma_v$ 는 각각 수평과 수직 주시 위치에 대한 표준편차,  $\rho$ 는 수평과 수직 주시 위치의 피어슨 곱적률 상관 계수(Pearson product-moment correlation)이며, k는 확률면적에 의해 결정되며 확률면적이 68.2%(±1SD)일 때 1.146이다.

둘째 방법은 식(2)에 의해 길이와 폭으로 이루어진 표준편차의 면적(SD area)으로 평가하였다.

$$SD_{area}=4SD_hSD_v \quad (2)$$

여기서  $SD_h$ 와  $SD_v$ 는 각각 수평과 수직 주시 위치에 대한 표준편차이다. 위의 두 식에서 구한 추적안구운동 평가의 한 예로서 RStudio 소프트웨어(Version 1.3.1093, RStudio, USA)를 사용하여 Fig. 1과 같이 나타내었다.

여기서 평가 단위는 pixel<sup>2</sup>로 나타내었으며 pixel 단위를 deg 단위로 환산하기 위해 550 mm를 기준으로 환산인자 0.032 deg/pixel<sup>[16,21]</sup>을 사용하였다. 또한 수평과 대각선 방향보다 짧은 수직 방향의 면적 계산은 1.33배로 환산하였다. 각각의 방법에서 구한 면적이 작을수록 분산이 작아 즉, 변동성이 작아 안정적이고 정확하다는 의미이다. 각 방향의 추적안구운동은 두 가지 방법으로 구한 면적의 크기에 준하여 상대적 비교와 상관관계를 분석하였다.

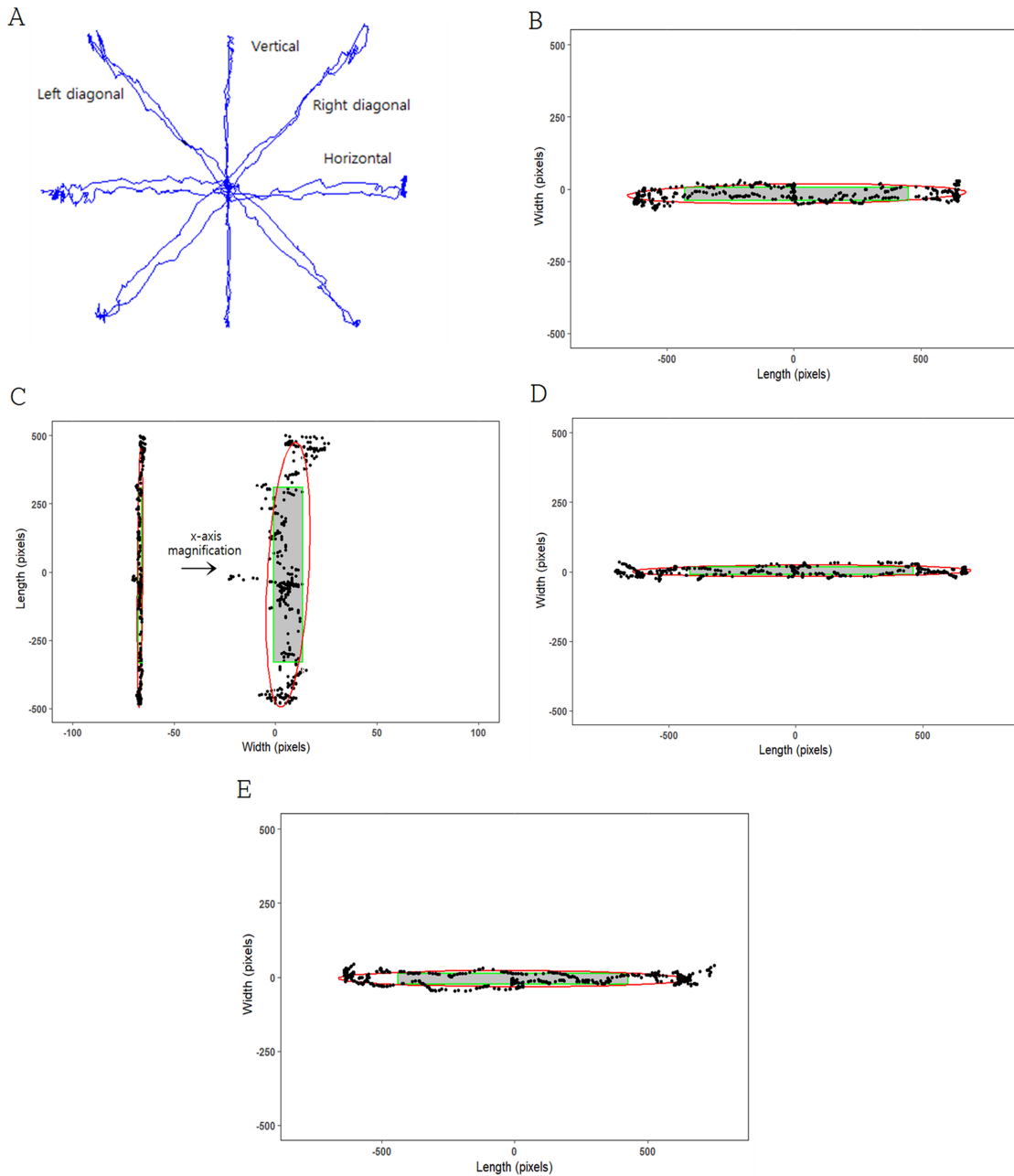


Fig. 1. Examples for gaze points of pursuit eye movements in the nine directions.

A. Nine directions (center, left, right, upper, lower, upper left, lower right, upper right, and lower left), B. Horizontal eye movements, C. Vertical eye movements, D. Left diagonal eye movements (a counterclockwise rotation by 45° to represent length and width): E. Right diagonal eye movements (a clockwise rotation by 45° to represent length and width)

Bivariate contour ellipse area (BCEA) is the red ellipse area, and standard deviation (SD) area is the green-gray rectangular area.

### 5. 데이터 분석

수집된 데이터는 MedCalc 소프트웨어(Version 12.7.7.0, MedCalc Software, Belgium)를 사용하여 통계 분석하였다. 표본의 수가 25로 적고 정규성 검정이 충족되지 않아 비모수적 방법으로 통계 분석하였다. 평균 차이는 Kruskal-Wallis로 검정하였고, Wilcoxon로 사후검정하였으며, Spearman 상관계수( $r_s$ )로 상관분석과 선형회귀 분석을 하

였다. 통계 분석에서 유의확률( $p$ )이 유의수준( $\alpha$ ) 0.05 이하 일 때 유의한 것으로 판정하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 대상자의 특성

추적안구운동 평가에 참여한 25명(남 13명, 여 12명)의

Table 1. Characteristics of the subjects

Characteristics	Value
Male/female (N)	13/12
Age (years)	21.04±1.67
Visual acuity with correction (decimal)	0.7 to 1.2
Spherical equivalent (D)	-3.71±2.62
Phoria at distance (△) <sup>†</sup>	-0.80±0.81
Phoria at near (△) <sup>†</sup>	-3.40±2.33
Gradient AC/A <sup>‡</sup>	5.25±0.97
With/without correction (N)	20/5

Data are presented as mean±standard deviation (SD).

<sup>†</sup>: Plus and minus sign in phoria indicate esophoria and exophoria, respectively

<sup>‡</sup>: Accommodative convergence/accommodation ratio

평균 연령은 21.04±1.67세(19~25세)였으며, 대상자의 특성은 Table 1과 같다. 안경이나 콘택트렌즈 착용자가 20명, 미 착용자가 5명으로 대상자의 다수가 비정시안이 교정된 상태였으며, 양안시이상의 증상이나 징후를 보이지 않았다.

2. BCEA와 SD 면적 기준의 추적안구운동 비교

추적안구운동 평가는 BCEA와 SD를 기준으로 면적(deg<sup>2</sup>)으로 정량화하여 분석하였다. 그 결과 Table 2와 같이 BCEA는 수직 방향의 추적안구운동 58.42±31.04 deg<sup>2</sup>에서 왼쪽 대각선 방향의 추적안구운동 100.60±41.31 deg<sup>2</sup>까지 분포하였으며, SD 면적은 수평 방향의 추적안구운동 42.45±17.66 deg<sup>2</sup>에서 왼쪽 대각선 방향의 추적안구운동 81.57±29.64 deg<sup>2</sup>였으며, 모든 방향에서 BCEA는 크게, SD 면적은 작게 평가되었다(Wilcoxon test, *p*<0.05).

BCEA 기준의 추적안구운동 평가는 Kruskal-Wallis 검정에서 평균의 차이가 유의하였고(*p*<0.01), Wilcoxon에 의한 사후검정에서 수평과 수직 방향의 추적안구운동은 왼쪽과 오른쪽 대각선 방향의 추적안구운동과 유의한 차이를 보였으나 수평과 수직 방향 간의 차이와 두 대각선 방향 간

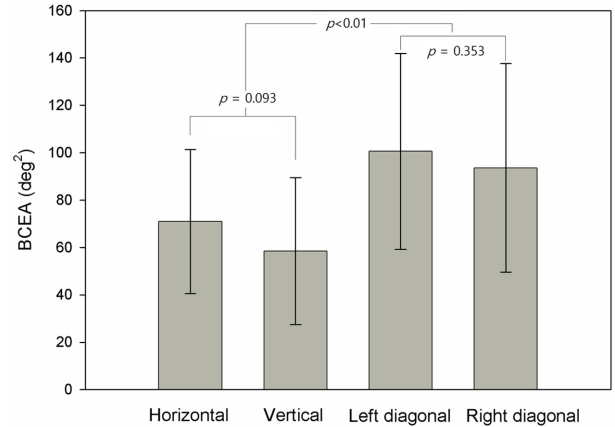


Fig. 2. Bivariate contour ellipse area (BCEA) for pursuit eye movements; error bars represent standard deviation (SD).

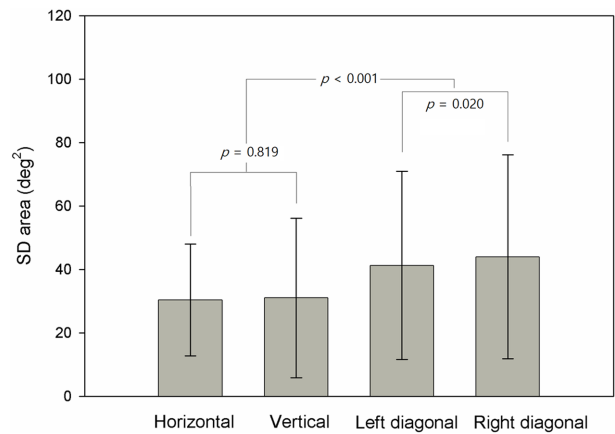


Fig. 3. Areas (length × width) for pursuit eye movements; error bars represent standard deviation (SD).

의 차이는 유의하지 않았다(Fig. 2).

SD 면적 기준의 추적안구운동 평가는 Kruskal-Wallis 검정에서 평균의 차이가 유의하였고(*p*<0.01), Wilcoxon에 의한 사후검정에서 수평과 수직 방향의 추적안구운동은 왼쪽과 오른쪽 대각선 방향의 추적안구운동과 유의한 차이

Table 2. Comparisons between BCEA and SD area

Direction	N	BCEA (deg <sup>2</sup> ) <sup>†</sup>	SD area (deg <sup>2</sup> )	<i>p</i> -value <sup>‡</sup>
Horizontal	25	70.91±30.40 (63.90)	42.45±17.66 (40.65)	<i>p</i> <0.001*
Vertical	25	58.42±31.04 (47.47)	45.78±25.15 (36.66)	<i>p</i> <0.001*
Left diagonal	25	100.60±41.31 (89.91)	81.57±29.64 (77.53)	<i>p</i> =0.007*
Right diagonal	25	93.61±44.01 (77.94)	68.99±32.16 (67.60)	<i>p</i> <0.001*
All	100	80.89±40.40 (71.69)	59.70±30.97 (50.91)	<i>p</i> <0.001*

Data are presented as mean±standard deviation (SD), and median in parentheses.

BCEA = bivariate contour ellipse area.

SD area is the area based on the standard deviation of length and width.

<sup>†</sup>: Bivariate contour ellipse area for ±1SD.

<sup>‡</sup>: Wilcoxon test.

\*: *p*<0.05 indicates significant difference.

를 보였으나 수평과 수직 방향 간의 차이는 유의하지 않았고, 두 대각선 방향 간에는 유의하였다(Fig. 3).

추적안구운동은 BCEA나 SD 면적 기준에서 모두 수평과 수직 방향이 대각선 방향보다 상대적으로 안정한 상태로 정확하였다.

### 3. BCEA와 SD 면적의 상관성

BCEA와 SD 면적의 상관관계는 두 변수가 정규성 분포에 따르지 않아 Spearman 상관계수( $r_s$ )를 분석하였다. 그 결과는 Fig. 4와 같다. 수평과 수직 방향의 상관계수는 각각 0.898과 0.993로 대각선 방향의 0.665와 0.693보다 매

우 높은 상관성을 보였다. 이러한 경향은 대각선 방향의 추적안구운동의 변동성이 커서 수평이나 수직 방향보다 정확도가 낮다는 의미로 해석된다.

BCEA와 SD 면적 기준의 추적안구운동 평가 결과를 상대적으로 비교해 보면 BCEA는 넓게, SD 면적은 좁게 나타나 BCEA 기준은 과대평가의 경향을, 반면 SD 기준은 과소평가의 경향을 보였다. 본 연구의 방법에서 제시한 예(Fig. 1)와 같이 두 기준은 모두 표준편차에 기반하는 면적이다. BCEA 기준의 평가에서 타원 형태의 확률면적은 눈이 주시하는 방향의 길이는 충분히 반영하나 폭은 과도하게 반영하는 측면이 있다. SD 기준의 평가는 직선 방향의

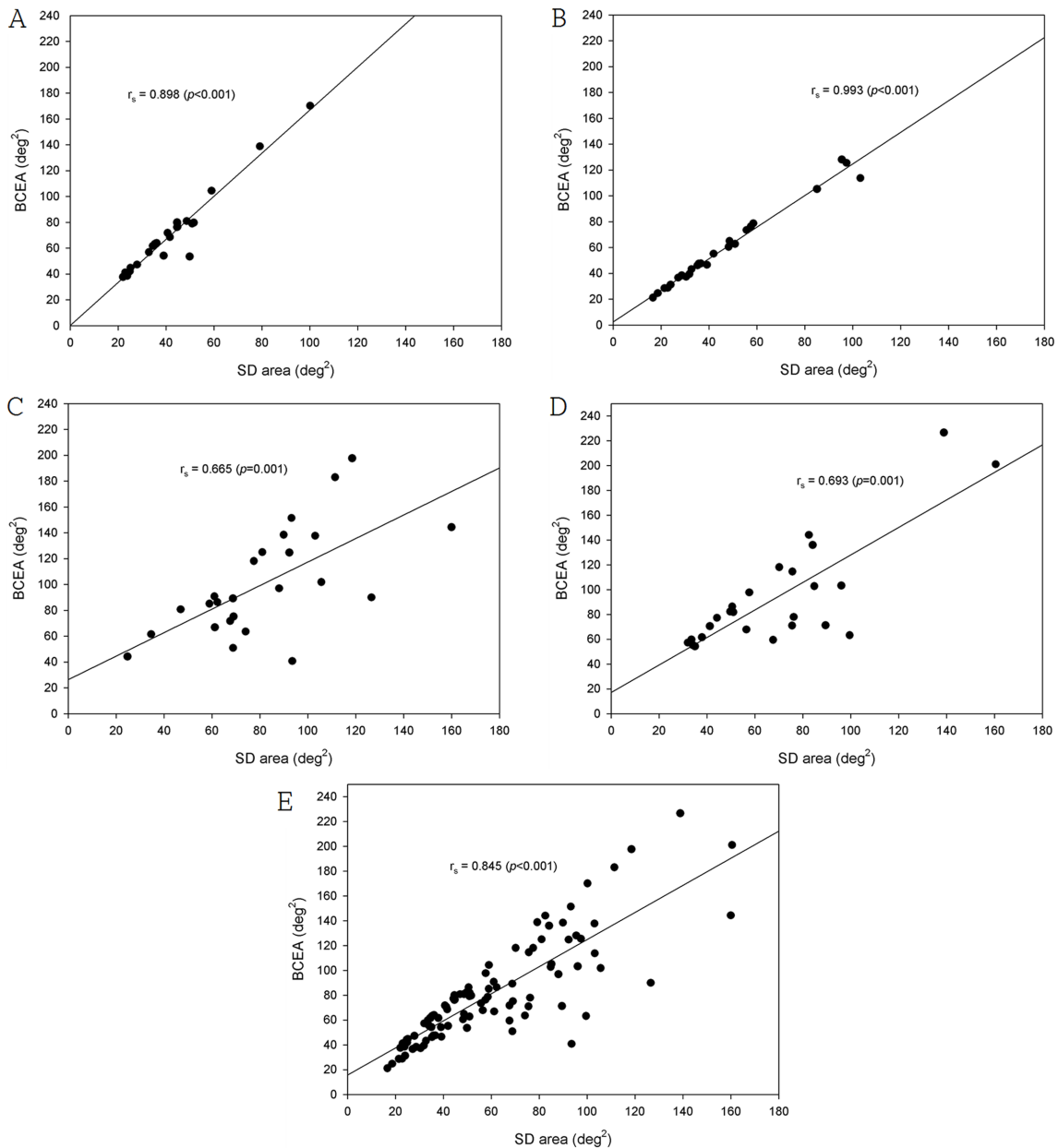


Fig. 4. Spearman's correlation scatter plots and linear regression between bivariate contour ellipse area (BCEA) and standard deviation (SD) area. A. Horizontal direction, B. Vertical direction, C. Left diagonal direction, D. Right diagonal direction, E. All directions

길이와 폭으로 이루어진 면적이지만 눈이 주시하는 전 영역에서 폭은 잘 반영하나 길이는 충분히 반영하지 못하는 측면이 있다. BCEA와 SD 면적 기준의 추적안구운동의 상관성은 수평과 수직 방향이 대각선 방향보다 매우 높았다. 이러한 결과는 대각선 방향의 추적안구운동이 안정적이지 못하다는 것을 의미한다.

이전의 Hirota 등<sup>[13]</sup>은 연구에서 비디오-안구운동 및 덤러닝 기반 객체 감지를 이용하여 건강한 사람을 대상으로 9개 방향 추적안구운동을 분석하였다. 분석은 타깃 이동 속도에 대한 안구 이동의 속도비를 나타내는 이득(gain)과 시 자극의 시작과 안구운동의 시작의 차이를 나타내는 잠복기(latency) 기준으로 평가하였고, 임상에서 타각적으로 안구운동 이상을 평가하는데 정확하다고 제시하였다. 또한, 최근에 발표된 연구<sup>[22]</sup>에서 의하면 추적안구운동을 주시 타깃의 움직임과 대비되는 눈 주시 움직임으로 사위도에 따라 평가한 결과에서 사위가 정상인 경우가 주시 성공률이 높았다. 본 연구는 앞에 언급한 연구들과 다른 방법으로 BCEA와 SD 면적 기준의 추적안구운동 평가하였고, 평가 결과에서 수평과 수직 방향의 추적안구운동이 대각선 방향의 추적안구운동보다 안정한 것으로 확인되었다. Rottach 등<sup>[23]</sup>에 의하면 건강한 사람을 대상으로 평가한 수평 방향의 추적안구운동은 수직 방향의 추적안구운동보다 타깃 이동 속도에 대한 안구 이동 속도의 비, 즉 이득이 더 큰 것으로 더 정확하다고 평가하였다. 대각선 방향의 추적안구운동에서도 수평 방향이 수직 방향보다 더 정확하다고 하였고, 추적안구운동은 수평과 수직이 서로 분리하여 제어된다고 하였다. 이를 미루어 볼 때 수평, 수직 및 대각선의 추적안구운동의 정량적 평가에서 상호 간의 차이를 예상할 수 있으나 본 연구의 결과는 수평과 수직 방향에서 유의한 차이는 없었고, 이 두 방향과 대각선 방향 사이에서 유의한 차이를 보였다.

한편, Collewijn 등<sup>[24]</sup>은 일상생활에서 많이 사용하는 수평 방향의 추적안구운동이 수직 방향보다 더 정확하며, 수직 방향의 추적안구운동은 훈련에 의해 개선된다는 것을 제안하였다.<sup>[25]</sup> 이를 본 연구의 결과에 적용해 보면 임상에서 대각선 방향의 추적안구운동이 많지 않은 만큼 이 방향에서의 추적안구운동은 정확도가 떨어진 것으로 파악한다.

추적안구운동의 정확도를 속도 중심으로 평가할 때 움직이는 방향에 따라 다양하다.<sup>[13,26,27]</sup> 수평 방향의 운동이 수직 방향보다 더 정확하며, 수평과 수직 방향의 운동이 대각선 방향보다 정확하다고 하였다. 이를 미루어 볼 때 본 연구에서 수평과 수직 방향이 대각선 방향보다 더 정확하다는 결과와 일치하는 측면이 있으나 이러한 차이에 대해 이유를 현시점에서 신경학적으로 명확하게 설명할 수

없다. 그러나 이러한 차이는 수평, 수직 및 대각선 방향의 추적안구운동은 외안근에 작용하는 신경 지배의 경로의 유사성과 차별성에 기인하는 것으로 추정할 수 있다.<sup>[9,28]</sup>

본 연구의 한계점은 추적안구운동 평가 결과의 일반화를 위한 대상자의 다양성이 부족하다는 것과 추적안구운동에 미치는 여러 요인을 고려하지 않았다는 것이다. 추적안구운동 평가의 임상 적용을 위한 일반화 과정은 사위 정도가 다양한 다수의 대상자가 필요하다. 또한, 추적안구운동은 타깃의 크기와 밝기, 가속이나 이동 속도 등의 요인을 충분히 통제할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 임상 적용의 기초 연구로서 정상 범위의 대상자로 한정하였고, 타깃의 이동 속도는 일반적으로 제시한 속도보다 느리게 하여 속도에 기인하는 영향을 최소화하였다. 이러한 통제된 조건에서 정상 범위의 사위를 갖는 대상자를 중심으로 아이트래커를 이용한 추적안구운동 평가가 가능하였다.

## 결론

아이트래커를 이용한 추적안구운동의 임상 적용은 BCEA와 SD 면적 기준으로 가능하였다. 추적안구운동 평가에서 BCEA 기준의 평가는 과대평가의 경향을 보였고, SD 면적 기준의 평가는 과소평가하는 경향을 보였다. 두 평가 방법 간의 상관성은 뚜렷하였으며, 수직과 수평 방향이 대각선 방향보다 높은 상관성을 보였다. 또한 두 방법에서 추적안구운동은 대각선 방향보다 수평과 수직 방향에서 더 정확하였다.

## REFERENCES

- [1] Scheiman M, Wick B. Clinical management of binocular vision: heterophoric, accommodative, and eye movement disorders, 4th Ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2014;25-43.
- [2] Hansraj R. Pursuit eye movements: a review. African Vision and Eye Health. 2008;67(4):160-165. DOI: <https://doi.org/10.4102/aveh.v68i4.195>
- [3] Maples WC, Atchley J, Ficklin Northeastern State University College of Optometry's oculomotor norms J Behav Optom. 1992;3(6):143-150.
- [4] Hunfalvay M, Roberts CM, Murray N, et al. Horizontal and vertical self-paced saccades as a diagnostic marker of traumatic brain injury. Concussion. 2019;4(1):CNC60. DOI: <https://doi.org/10.2217/cnc-2019-0001>
- [5] Orduna-Hospital E, Navarro-Marqués A, López-de-la-Fuente C, et al. Eye-tracker study of the developmental eye movement test in young people without binocular dysfunctions. Life. 2023;13(3):773. DOI: <https://doi.org/10.3390/life13030773>

- [6] Hassan MA, Yin X, Zhuang Y, et al. A digital camera-based eye movement assessment method for NeuroEye examination. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2023;1-12. DOI: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2023.3285940>
- [7] Holmqvist K, Örbom SL, Hooge ITC, et al. Eye tracking: empirical foundations for a minimal reporting guideline. *Behav Res Methods*. 2023;55(1):364-416. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01762-8>
- [8] Zammarchi G, Conversano C. Application of eye tracking technology in medicine: a bibliometric analysis. *Vision*. 2021;5(4):56. DOI: <https://doi.org/10.3390/vision5040056>
- [9] Hunfalvay M, Roberts CM, Murray NP, et al. Vertical smooth pursuit as a diagnostic marker of traumatic brain injury. *Concussion*. 2020;5(1):CNC69. DOI: <https://doi.org/10.2217/cnc-2019-0013>
- [10] Boo M, Matheson G, Lumba-Brown A. Smooth pursuit eye-movement abnormalities associated with cervical spine whiplash: a scientific review and case report. *Cureus*. 2020;12(8):e9872. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.9872>
- [11] Pearce AJ, Daly E, Ryan L, et al. Reliability of a smooth pursuit eye-tracking system (EyeGuide Focus) in healthy adolescents and adults. *J Funct Morphol Kinesiol*. 2023;8(2):83. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfmk8020083>
- [12] Lions C, Bui-Quoc E, Wiener-Vacher S, et al. Smooth pursuit eye movements in children with strabismus and in children with vergence deficits. *PLoS One*. 2013;8(12):e83972. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083972>
- [13] Hirota M, Kato K, Fukushima M, et al. Analysis of smooth pursuit eye movements in a clinical context by tracking the target and eyes. *Sci Rep*. 2022;12(1):8501. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12630-6>
- [14] Murray N, Kubitz K, Roberts CM, et al. An examination of the oculomotor behavior metrics within a suite of digitized eye tracking test. *Vis Dev Rehabil*. 2019;5(4):269-284.
- [15] Kim SY, Moon BY, Cho HG, et al. Quantitative evaluation of the association between fixation stability and phoria during short-term binocular viewing. *Front Neurosci*. 2022;16:721665. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.721665>
- [16] Kim SY, Moon BY, Cho HG, et al. Comparison of image-based quantification methods in evaluating fixation stability using a remote eye tracker in abnormal phoria. *J Int Med Res*. 2022;50(5):3000605221098183. DOI: <https://doi.org/10.1177/03000605221098183>
- [17] Kim SY, Moon BY, Cho HG, et al. Comparative analysis of fixation stability before and after blinking during binocular viewing. *J Korean Ophthalmic Opt Soc*. 2023;28(1):9-17. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2023.28.1.9>
- [18] Bilbao C, Piñero DP. Objective and subjective evaluation of saccadic eye movements in healthy children and children with neurodevelopmental disorders: a pilot study. *Vision*. 2021;5(2):28. DOI: <https://doi.org/10.3390/vision5020028>
- [19] Holmqvist K, Nyström N, Andersson R, et al. Eye tracking: a comprehensive guide to methods and measures, 1st Ed. Oxford: Oxford University Press, 2011;329-330.
- [20] Steinman RM. Effect of target size, luminance, and color on monocular fixation. *J Opt Soc Am*. 1965;55(9):1158-1165. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.001158>
- [21] Kar A, Corcoran P. Performance evaluation strategies for eye gaze estimation systems with quantitative metrics and visualizations. *Sensors*. 2018;18(9):3151. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18093151>
- [22] Kim BJ, Jang YJ, Kang HK, et al. A study on types and success rate for gaze using an eye tracker. *The Summer Conference of the Korean Ophthalmic Optics Society in 2023*. 2023;64.
- [23] Rottach KG, Zivotofsky AZ, Das VE, et al. Comparison of horizontal, vertical and diagonal smooth pursuit eye movements in normal human subjects. *Vision Res*. 1996;36(14):2189-2195. DOI: [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00302-9](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00302-9)
- [24] Collewijn H, Tamminga EP. Human smooth and saccadic eye movements during voluntary pursuit of different target motions on different backgrounds. *J Physiol*. 1984;351(1):217-250. DOI: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1984.sp015242>
- [25] Mani R, Hunfalvay M, Murray NP, et al. Oculomotor training for poor pursuits improves functional vision scores and neurobehavioral symptoms. *Optom Vis Perform*. 2022;10(4):206-215.
- [26] Krukowski AE, Stone LS. Expansion of direction space around the cardinal axes revealed by smooth pursuit eye movements. *Neuron*. 2005;45(2):315-323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.01.005>
- [27] Ke SR, Lam J, Pai DK, et al. Directional asymmetries in human smooth pursuit eye movements. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2013;54(6):4409-4421. DOI: <https://doi.org/10.1167/iovs.12-11369>
- [28] Park JM, Lee TK. Basics of eye movement. *Clin Neuroophthalmol*. 2011;1(1):1-9.

## 추적안구운동에서 아이트래커의 임상 적용

문병연, 조현국, 김상엽, 유동식\*

강원대학교 안경광학과, 교수, 삼척 25949

투고일(2023년 7월 25일), 수정일(2023년 8월 8일), 게재확정일(2023년 8월 8일)

**목적:** 추적안구운동 평가에서 아이트래커의 임상 적용의 가능성을 찾고자 하였다. **방법:** 대상자는 정상 범위의 사위를 갖는 25명(평균 21.04±1.67세)으로 하였다. 임상아이트래커를 이용하여 수평, 수직 및 대각선 방향의 추적안구운동을 측정하였고, BCEA와 SD 면적으로 구하여 분석하였다. 타깃의 이동 범위를 40도(°)로 한정하여 추적안구운동을 평가하였다. **결과:** 추적안구운동은 BCEA에 의한 평가에서 수직 방향의 58.42 deg<sup>2</sup>에서 왼쪽 대각선 방향의 100.60 deg<sup>2</sup>까지, SD 면적에 의한 평가에서 수직 방향의 42.45 deg<sup>2</sup>에서 왼쪽 대각선 방향의 81.57 deg<sup>2</sup>까지 나타났다. 상대적 비교에서 BCEA와 SD 면적에 의한 평가는 각각 과대평가와 과소평가를 보였다. BCEA와 SD 면적 간의 Spearman 상관계수는 왼쪽 대각선 방향의 0.665로부터 수직 방향의 0.993까지 범위였다. 두 평가 모두 수평과 수직 방향이 대각선 방향보다 안정적이고 정확하였다. **결론:** 이 연구는 정상적인 사위를 가진 대상자 한하여 아이트래커를 이용하여 여러 주시 방향에서 BCEA와 SD 면적 기준으로 추적안구운동을 평가할 수 있음을 보여준다.

**주제어:** 추적안구운동, 아이트래커, 이변량 등고선 타원 면적, 표준편차 면적, 사위