

## 자동 판별 알고리즘에 의한 동안계의 정량적인 해석

장인호 · 이세현 · 이용천 · 박상희

=Abstract=

### Quantitative Analysis of Oculomotor System by Automatic Identification Algorithm

In-Ho Chang, Se-Hyeon Rhee, Young-Chun Rhee, Sang-Hui Park

In this paper, the design and implementation of a microcomputer-based measuring system for quantitative analysis of oculomotor system are described. An algorithm for microcomputer analysis of electro-oculographically recorded horizontal saccadic eye movements is presented.

From a brief, 4-min recording session detailed statistical information about saccade amplitude, duration, and velocity can be obtained.

#### 1. 서 론

시각계통은 인간에 있어서 일차적인 감각입력 채널로서 눈을 통해 많은 정보를 받아들이며, 이러한 정보를 인지하기 위하여 동안계(Oculomotor system)는 여러 부시스템(subsystem)을 통해 안구를 제어한다. 이러한 부시스템 중에서 안구는 대부분 saccadic 시스템에 의해 제어되는데, 특히 책을 읽거나 그림을 볼 때 안구는 시계 안에서 한 시표로부터 다른 시표까지 가능한 짧은 시간 내에 움직이기 위하여 saccade라 불리는 이동이 일어난다<sup>1)</sup>.

Saccadic 안구운동의 특성을 1901년 Dodge와 Cline이 정의한 이래 여러 분야에서 이의 특성에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이와같은 saccadic 안구운동은 각변위(amplitude)에 대한 최대속도(peak velocity)와 지속시간(duration)으로 특성지워지며, 이는 수의적으로 또는 연습·자극요인에 의해 영향을 받지 않기 때문에, 이를 정량적으로 측정하여 해석하게 되면 동

안계와 이에 대한 중추신경계(CNS)의 기능검사로써 사용될 수 있으며 임상적으로는 신경기전의 질병진단에 사용될 수 있다.

그러나 saccadic 안구운동의 주요 파라메타(그림 1)

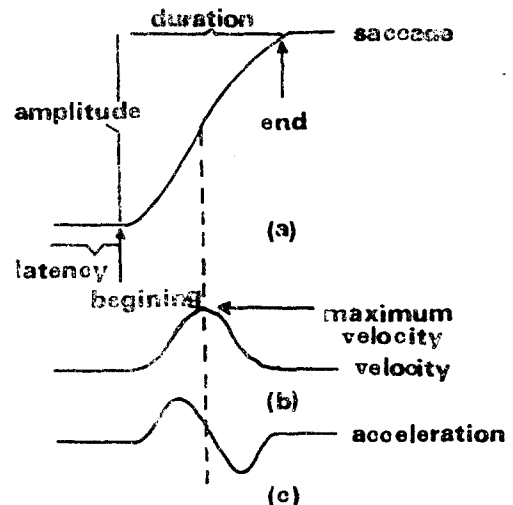


그림 1. Saccade의 주요 파라메타  
Fig. 1. The saccade with its main parameters.

<접수 : 1986년 12월 11일>  
연세대학교 공과대학 전기공학과  
Dept. of Electrical Eng. Yonsei University

를 측정하여 처리하는 방법은 서로 틀려 각각의 연구 결과를 비교하는 데 한계가 있다. 1981년 Bahill 등<sup>2)</sup>은 안구운동을 정량적으로 측정하여 각각의 결과를 비교하기 위한 측정법칙(general rules)을 제안하였으나, 이 측정법칙은 항상 각각의 실험환경에 적용시킬 수 없다.

본 연구에서는 안구운동의 측정법칙을 보완하고, 이 측정법칙에 따라서 빠르고 정확하게 정량적인 해석을 하기 위한 마이크로 컴퓨터를 이용한 안구운동 측정 시스템을 구성하며, 이 측정 시스템에 의하여 saccadic 안구운동의 주요 파라메타를 측정하는 자동 판별 알고리즘을 제시하고자 한다. 그리고 측정된 데이터에 대하여 샘플링 주파수 및 속도계산 알고리즘에 의한 영향을 고찰해 보며, 각 특성곡선의 근사식을 제시한다.

## 2. 안구운동의 정량적인 해석

### (1) 안구운동의 측정법칙

Bahill 등은 광전행렬(photoelectric)법으로 안구운동의 정량적인 데이터를 얻었으며, 각 실험환경에 의한 결과를 비교하기 위한 측정법칙을 다음과 같이 제안하였다.

- 가) 동일연령의 정상인 피검자
- 나) 피로한 피검자의 안구운동은 해석에서 제외
- 다) Saccade의 각변위, 함수로써 최대속도와 지속 시간을 계산
- 라) 속도 문턱값을 이용하여 속도파형에 의한 saccade의 판별
- 마) 속도를 계산하기 위해 영위상(zero-phase) 디지털 필터의 사용
- 바) 기록장치는 전체 측정범위에서 선형성을 유지 또한, saccadic 안구운동의 지속시간을 1 ms 단위로 측정하고, 속도를 정확히 계산하기 위하여 안구운동 데이터를 1000 Hz로 샘플링할 것을 제안하였다.

그러나 위의 측정법칙에서 속도의 계산시간과 안구운동의 데이터를 저장할 메모리나 floppy disk의 용량이 적용 경우에는 1000 Hz 샘플링 주파수를 적용할 수 없다.

1985년 Juhola 등<sup>3)</sup>이 안구운동 해석에 있어서 샘플링 주파수의 영향을 simulation 한 결과, 200 Hz 샘플링 주파수 이하에서는 속도신호에서 샘플링 주파수의 영향을 받는다고 결론지었다.

그리고 광전행렬법은 20° 이하의 변위에서 선형성을

유지하지만 이 변위 이상에서는 선형성을 유지하지 못하는 반면 EOG(Electro-oculograph)법은 이보다 큰 변위에서도 선형성 및 높은 신뢰도를 갖는다<sup>4)</sup>.

### (2) 속도계산 알고리즘

Saccadic 안구운동의 위치신호로부터 속도를 계산하기 위하여 1차의 미분 알고리즘<sup>5)</sup>이 적용된다.

1982년 Bahill 등<sup>6)</sup>은 미분 알고리즘을 저역통과 필터(low-pass filter)와 직렬로 연결된 이상적인 미분기(ideal differentiator)로 모델링할 때의 주파수 제한 특성을 연구하였다. 그들은 안구운동에 대한 위치신호와 속도신호의 전력스펙트럼밀도(power spectral density)를 구하여 위치 스펙트럼에서의 전력은 50 Hz에서 40 dB로 감쇠(attenuation)되고, 속도 스펙트럼에서는 74 Hz에서 40 dB로 감쇠됨을 알았다. 이에 따라 saccadic 안구운동을 해석하는 시스템에서 100 Hz 아날로그 저역통과 필터의 사용을 제안하였다.

1983년 Bahill과 McDonald<sup>7)</sup>은 saccadic 안구운동을 측정하는데 있어 알고리즘에 의한 오차와 데이터에 포함된 오차의 합이 최소가 되도록 하는 최적의 스텝 크기(optimal step size)  $h\phi$ 를 3 ms로 구하였다. 이 스텝크기에 따라 알고리즘의 차단주파수(cutoff frequency)는 74 Hz라는 결론을 얻었으며, 이에 따른 twopoint central difference 미분 알고리즘으로서

$$v_y(i) = [y(i+3) - y(i-3)]/6T \quad \dots(1)$$

이고, 전달함수는

$$\frac{V_y}{Y} = j\omega \frac{\sin(\omega h)}{\omega h} \quad \dots(2)$$

로써, 이의 주파수 응답은 그림 2(a)와 같다.

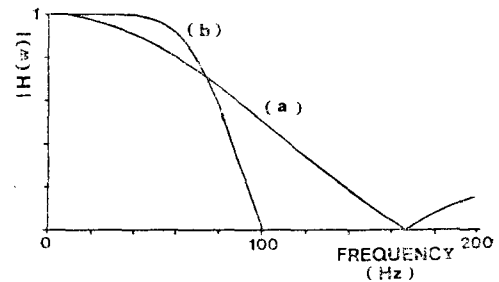


그림 2. 미분 알고리즘의 주파수 응답  
(a) two-point 미분 알고리즘  
(b) eight-point 미분 알고리즘

Fig. 2. The frequency responses of derivative algorithm

- (a) Two-point derivative algorithm
- (b) Eight-point derivative algorithm

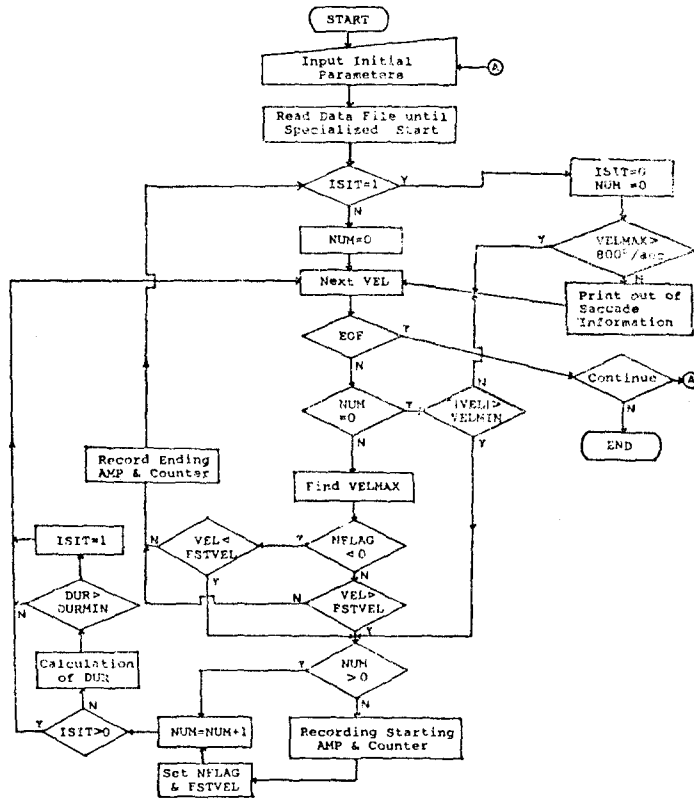


그림 3. 자동 판별 알고리즘의 흐름도  
Fig. 3. The flow chart of automatic identification algorithm.

본 연구에서는 200 Hz 로 샘플링된 데이터에 적용하는 속도계산 알고리즘을 구했다. 이는 1000 Hz 로 샘플링된 데이터에 식 (1)을 적용하여 얻은 결과와 비교하기 위해 식 (1)과 동일한 차단주파수를 갖는 eight-point central difference 미분 알고리즘으로서

$$v_y(i) = f_s \sum_{n=1}^4 a_n [y(i+n) - y(i-n)] \quad \dots(3)$$

여기서,  $a_1=0.8024$ ,  $a_2=-0.2022$ ,  $a_3=0.03904$ ,  $a_4=-0.003732$ 이고, 전달함수는

$$\frac{V_y}{Y} = j\omega \sum_{n=1}^4 \frac{2a_n \sin(n\omega/f_s)}{\omega/f_s} \quad \dots(4)$$

이며, 이의 주파수 응답은 그림 2 (b)이다.

그림에서 식 (1)과 식 (3)은 저역통과 필터로 동작되며, 식 (3)이 식 (1)보다 좀더 급한 차단특성을 나타내며, 통과대역에서 매우 편평한 특성을 나타내고 있다.

### (3) 자동 판별 알고리즘

saccadic 안구운동의 특성인 지속시간과 최대속도를

측정하려면 saccade의 발생여부를 판별하여야 한다. 최근에 전자공학 및 컴퓨터공학의 발전으로 조작자(operator)의 관측에 따르지 않고 정량적인 해석을 하기 위한 saccade의 자동 판별에 대하여 많은 알고리즘이 제시되었다<sup>8)</sup>

본 연구에서는 판별 알고리즘에 의하여 마이크로 컴퓨터에서 자동적으로 판별된다. 즉, 알고리즘은 지속시간 문턱값보다 큰 지속시간을 갖고 속도 문턱값을 초과하는 안구운동을 saccade라 판별하게 된다.

여기서 문턱값을 결정하기 위하여 데이터의 시표에 대한 정확도를 기준으로 하여 지속시간 문턱값을 30 ms로, 속도 문턱값을 10 deg/s로 구하였다. 안구운동 측정시 발생하는 눈깜박임(eye blink)은 이의 지속시간이 문턱값보다 작기 때문에, 또한 결함(artifact)은 이의 최대속도의 절대치가 800 deg/s를 초과하기 때문에 최대속도의 절대치를 800 deg/s와 비교하여 이를 saccade라 판별하지 않도록 하였다.

그림 3은 자동 판별 알고리즘의 흐름도를 나타낸다.

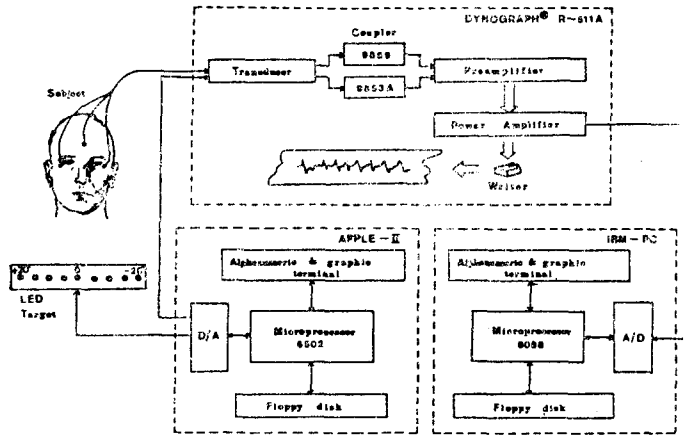


그림 4. 전체 실험 시스템의 블럭선도  
Fig. 4. The block diagram of overall experiment system.

이 알고리즘은 IBM-PC 마이크로 컴퓨터에서 FORTRAN-77 언어로 프로그래밍 하였다.

프로그램은 위치신호와 속도신호의 데이터가 저장된 화일을 읽어서 첫번째 과정에서 속도를 문턱값(VEL-MIN)과 비교하고, 두번째 과정에서 지속시간을 문턱값(DURMIN)과 비교하게 된다. 두번째 과정은 첫번째 과정의 조건을 만족하지 않으면 실행되지 않게 되며, 마지막으로 위의 두 과정의 조건을 만족한 경우에 최대속도를 800 deg/s와 비교하게 된다.

속도신호에서 속도 문턱값을 처음 넘는 점을 saccade의 개시점으로 잡고 다시 이 문턱값과 교차하는 점을 종료점으로 잡아서, saccade의 개시점과 종료점 사이의 각변위와 지속시간을 계산하고 최대속도를 찾아 이 알고리즘의 출력으로 한다.

### 3. 실험

#### 3-1. 측정 시스템의 구성

안구운동을 정량적으로 측정하기 위한 전체 시스템은 그림 4와 같다. 시표 구동 장치에 의해 랜덤한 시표를 발생하고, 이에 따라 피검자는 수평 saccadic 안구운동을 한다. 이러한 신호들을 기록장치에 입력되어 기록되며, IBM-PC에서 A/D 변환기를 거쳐 floppy disk에 저장된다.

##### 1) 시표 구동 장치

APPLE-II 마이크로 컴퓨터(CPU:6502, 64K byte)에 의해서 발생된 신호는 PIA(6532)를 거쳐 DAC(0808)와 decoder(74154)로 각각 전달된다. decoder

에 전달된 신호는 암실에 설치된 흑색 스크린에 좌우 대칭으로 9개의 적색 LED(직경 4 mm)를 통해  $\pm 20^\circ$  범위의 랜덤한 시표를 발생시키게 된다.

시표 구동은 어셈블리 언어와 이의 제어물 위한 BASIC언어를 사용하여, 교정(calibration)과정에서는 수동으로 구동시킨 후 자동으로 랜덤하게 변위하는 9개의 시퀀스에 의해 안구운동 신호를 얻도록 하였다.

##### 2) 기록장치

기록장치는 Beckman사의 R-511 A Dynograph 기록기를 사용하였다. 이 기록기에서 변환기와 커플러를 통과한 신호를 기록할 수 있도록 전치증폭기와 파워증폭기를 거치면서 증폭되고, 100 Hz의 저역통과 필터를 거친다. 저역통과 필터는 2-pole Butterworth 필터(12 dB/oct)로서 데이터에 포함된 100 Hz 이상의 주파수 성분을 제거하게 된다.

본 실험에서 사용된 커플러는 다음과 같다.

Type 9853 A는 Voltage/Pulse/Pressure로서 시표 구동 장치에서 DAC를 거친 아날로그 신호를 입력으로 받아 시표의 변위를 기록하게 된다.

Type 9859는 Direct Nystagmus 커플러로서 피검자가 시표 변위를 추적하여 발생하는 안구운동을 입력으로 하여 안구운동의 변위를 기록하게 된다.

##### 3) A/D 변환기와 IBM-PC 마이크로 컴퓨터

기록장치를 통과한 안구운동의 신호는 1 V phone jack을 통해 IBM-PC 마이크로 컴퓨터(CPU: 8088, Coprocessor: 8086, 512 Kbyte)로 입력된다. 입력된 신호는 10-bit A/D 변환기를 통과하면서 1000 Hz 샘플링 주파수에 의해 디지털 신호로 바뀌어지며, 이 신

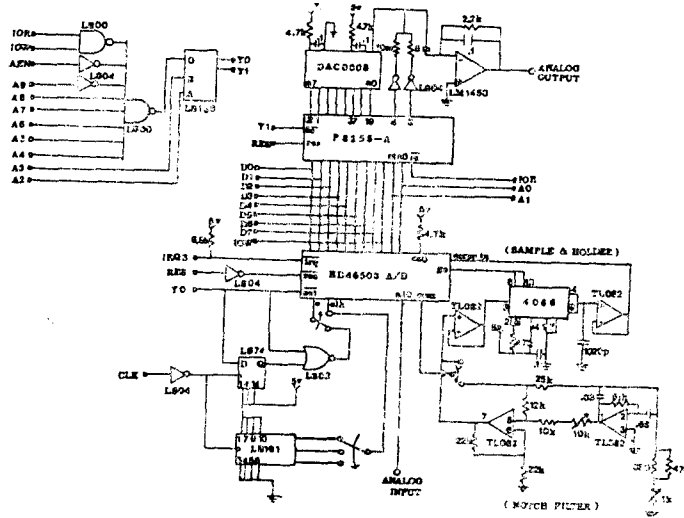


그림 5. A/D 변환기 회로도  
Fig. 5. The circuit diagram of A/D converter

호를 floppy disk 에 저장하게 된다.

본 실험에서 사용한 A/D 변환기는 HD 46508을 이용하여 제작하였으며, 이의 회로도는 그림 5와 같다.

### 3-2. 실험방법

#### 1) 피검자 및 측정방법

피검자는 양안이 정상인 23~25세의 성인 남자로서 5인을 선정하였으며, 안구의 피로를 방지하기 위하여 전체 실험시간을 4분 이내로 하였다.

안구운동을 기록하기 위해 3개의 Ag-AgCl 표면전극에 의해 EOG 법으로 5°~40°변위의 수평 saccadic 안구운동(binocular)을 측정하였다.

#### 2) 데이터의 기록

기록장치의 표준교정과 A/D 변환기의 오프셋(offset) 전압 조절을 끝낸 후 9개의 시퀀스에 대해 안구운동의 위치 신호를 얻는다. 각 시퀀스는 9~10개의 saccade 가 발생하도록 하였다.

기록장치에서는 랜덤한 시료 변위와 안구운동을 동시에 기록하고, 조작자는 기록된 신호를 비교하여 피검자가 피로한가를 조사하며, 피로한 피검자의 데이터 및 교정과정에서 선형성이 없는 데이터는 해석에서 제외하였다.

안구운동 데이터는 기록장치를 거치면서 100 Hz 저역통과 필터를 통과한 후 IBM-PC 의 A/D 변환기에 입력되고, 여기서 이를 1000 Hz 로 샘플링하여 floppy disk 에 저장된다.

#### 3) 속도계산 및 Saccade 의 판별

이상의 과정을 거쳐 측정된 1000 Hz 샘플링의 위치 신호에서 1 : 5의 비율로 줄여 200 Hz 샘플링 데이터를 얻었다. 여기서 100 Hz 저역통과 필터에 의해 100 Hz 이상의 주파수 성분을 제한하였으므로 aliasing 이 발생되지 않는다.

각각의 데이터에 대해서 식 (1)과 식 (3)의 속도계산 알고리즘을 적용하여 속도를 계산하고, 그림 3의 자동 판별 알고리즘을 적용하여 saccadic 안구운동의 주요 파라메타인 각변위, 지속시간, 최대속도를 계산한다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4-1. 특성곡선

#### 1) 1000 Hz 샘플링 데이터

그림 6은 1000 Hz 샘플링 데이터에 대한 특성곡선으로서 (a)는 각변위에 대한 지속시간, (b)는 각변위에 대한 최대속도의 관계를 나타내고 있다.

각변위에 대한 지속시간의 특성곡선에서 각변위가 큰 안구운동은 각변위가 작은 안구운동보다 큰 지속시간이 필요함을 알 수 있으며,

$$D = D_1 A + D_0 \quad \dots(5)$$

라는 선형식으로 근사시켰다. 여기서,  $D$  는 지속시간,  $A$  는 각변위이고,  $D_1$  은 기울기로서 2ms/deg,  $D_0$  는  $y$

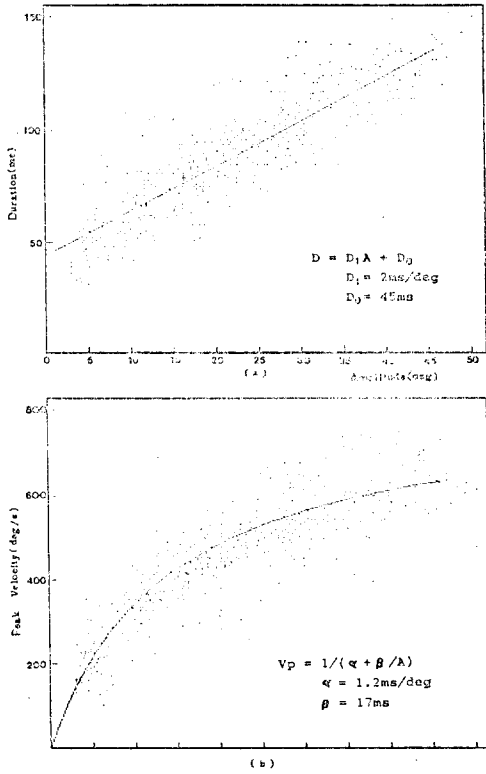


그림 6. 1000 Hz 샘플링 데이터의 특성곡선  
 (a) 각변위—지속시간  
 (b) 각변위—최대속도  
 Fig. 6. The characteristics of 1000 Hz-sampled data  
 (a) Amplitude-duration  
 (b) Amplitude-peak velocity

축과의 교차점으로 45 ms 를 얻었다.  $D_0$  는 각변위가  $0^\circ$  인 saccade 의 이론적인 지속시간으로서 실제적으로는  $5^\circ$  이하의 saccade 는 식 (5) 에 따르지 않으며, 각변위가  $0^\circ$  로 근접할 때는 선형식에 나타나는 지속시간 보다 더 빨리 감소한다.

각변위에 대한 최대속도의 특성곡선에서는

$$V_p = 1 / (\alpha + \beta / A) \quad \dots (6)$$

라는 포물선식으로 근사시켰다. 여기서,  $V_p$  는 최대속도,  $A$  는 각변위이며,  $\alpha$  와  $\beta$  는 계수로서 선형회기 (linear regression) 법을 이용하여 각각 1.2 ms/deg 와 17 ms 로 구하였다. 최대속도  $V_p$  는  $A \rightarrow \infty$  일 때  $V_{pmax} = 1/\alpha$  (deg/s) 의 값으로 포화 (saturation) 되고,  $A \rightarrow 0$  일 때  $1/\beta$  (1/ms) 의 기운기로 감소한다.

이 특성곡선에서 saccadic 안구운동의 최대속도는 각변위에 비례하나 그 증가율은  $5^\circ \sim 10^\circ$  에서 19.51,

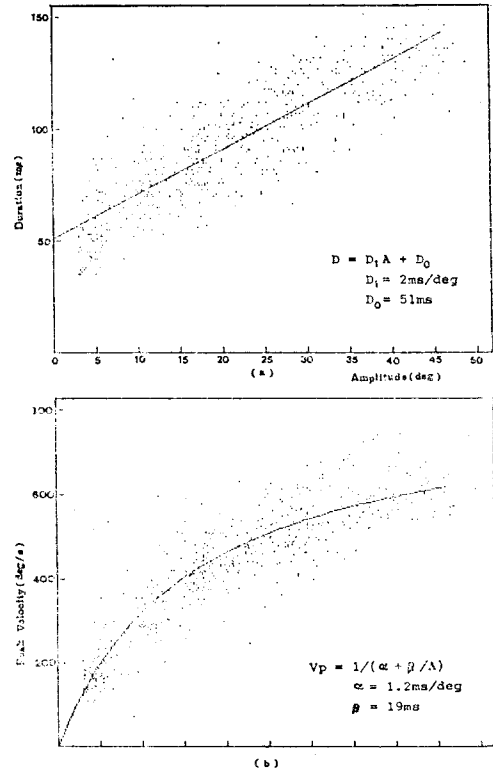


그림 7. 200 Hz 샘플링 데이터의 특성곡선  
 (a) 각변위—지속시간  
 (b) 각변위—최대속도  
 Fig. 7. The characteristics of 200 Hz-sampled data  
 (a) Amplitude-duration  
 (b) Amplitude-peak velocity

$10^\circ \sim 20^\circ$  에서 12.6,  $20^\circ \sim 30^\circ$  에서 7.64,  $30^\circ \sim 40^\circ$  에서 6.34 (deg/s) 로 서서히 감소되므로 큰 각변위에 대한 saccadic 안구운동의 각변위 최대속도의 관계는 비선형 특성을 나타낸다.

#### 2) 200 Hz 샘플링 데이터

그림 7은 200 Hz 샘플링 데이터에 대한 특성곡선으로서 (a)는 각변위에 대한 지속시간, (b)는 각변위에 대한 최대속도의 관계를 나타내고 있다. 각변위에 대한 지속시간의 특성곡선은 식 (5)로 근사되며, 여기서  $D_0 = 51$  ms 로 얻었다. 또한 각변위에 대한 최대속도의 특성곡선은 각변위가  $5^\circ \sim 10^\circ$  에서 19.44,  $10^\circ \sim 20^\circ$  에서 14.20,  $20^\circ \sim 30^\circ$  에서 6.55,  $30^\circ \sim 40^\circ$  에서 6.50 (deg/s) 로써 식 (6)으로 근사되며,  $\beta = 19$  ms 로 얻었다.

#### 4-2. 지속시간과 최대속도의 평균값

Saccadic 안구운동의 각변위에 대한 지속시간과 최

표 1. 지속시간의 평균값  
Table 1. The mean of duration

Amplitude(deg)	Mean o duration(ms)		Absolute error(%)
	1000 Hz	200 Hz	
5	47.05	52.53	11.65
10	64.98	72.85	12.11
15	75.52	81.93	8.49
20	85.90	91.12	6.08
25	94.87	99.82	5.22
30	106.60	111.90	4.67
35	114.02	116.35	2.04
40	124.38	128.60	3.39

표 2. 최대속도의 평균값  
Table 2. The mean of peak velocity

Amplitude(deg)	Mean of peak velocity(deg/s)		Absolute error(%)
	Two-point	Eight-point	
5	224.63	192.22	14.43
10	341.69	308.88	9.60
15	424.59	414.55	2.36
20	480.25	465.12	3.15
25	535.38	508.91	4.94
30	564.24	537.21	4.79
35	615.34	588.39	4.38
40	633.96	608.72	3.98

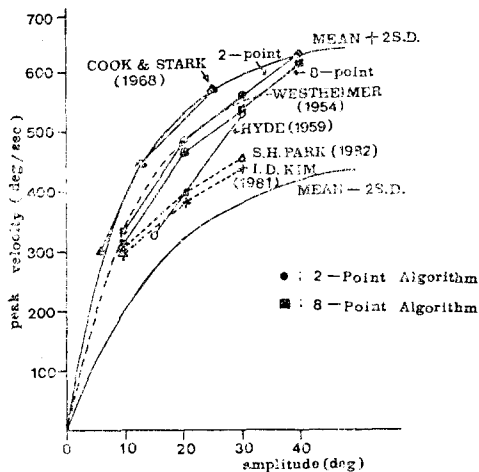


그림 8. 선행 연구와의 비교  
Fig. 8. The comparison of this study with previous study.

대속도의 평균값은 표 1과 표 2와 같다. 여기서, 1000 Hz 샘플링 데이터에서 얻은 결과와 200 Hz 샘플링 데이터에서 얻은 결과의 차는  $\pm 5\%$  이내이며, 최대로  $\pm 10\%$ 를 넘지 않는다.

#### 4-3. 선행 연구와의 비교

각번위에 대한 최대속도의 특성곡선이 샘플링 주파수의 영향을 거의 받지 않으므로 연구 결과를 비구하는 데 있어서 각번위와 최대속도의 관계를 이용한다. 그림 8은 최대속도의 평균값에 대하여 선행된 연구 결과와 본 연구 결과와의 비교를 나타내고 있다.

본 연구에서 two-point 속도계산 알고리즘(●표시)과 eight-point 속도계산 알고리즘(■표시)을 적용하여 얻은 결과는 Baloh 등이 EOG 법으로 추정하여 제시한 유효 한계치(mean $\pm$ 2S.D.)의 범위 내에 존재한다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 동안계를 정량적으로 해석하기 위해서 마이크로 컴퓨터를 이용한 측정 시스템을 설계 및 구성하였다. 이 측정 시스템에 의해서 EOG 법으로 측정된 수평 saccadic 안구운동에 대해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Bahill 이 제안한 안구운동의 정량적인 데이터를 얻기 위한 측정법칙을 보완하였다.
2. 안구운동의 해석은 200 Hz 샘플링 주파수로도 가능하다.
3. 200 Hz 로 샘플링된 데이터에 대한 속도계산을 위하여 eight-point central difference 미분 알고리즘을 제시하였다.
4. 안구운동의 위치신호와 속도신호에서 지속시간 문턱값 30 ms 와 속도 문턱값 10 deg/s 를 이용하여 saccade 의 발생 여부를 마이크로 컴퓨터에 의해서 자동적으로 판별하였다.
5. 각변위에 대한 지속시간 및 최대속도의 특성곡선을 얻었으며, 각 특성곡선에 대하여 각각 선형식과 포물선식으로 이를 근사시켰다.

### 참 고 문 헌

- 1) G. Wetheimer, "Mechanism of saccadic eye movements," *Arch. Ophthalmol.*, Vol. 52, pp. 710-724, 1954.
- 2) A.T. Bahill, A. Brocembrough, and B. Troost, "Variability and development of a normative data base for saccadic eye movements," *Invest*

*Ophthalmol. Vis. Sci.*, Vol. 21, pp.116-125, 1981.

- 3) M. Juhola, V. Jäntti, and I. Pyykkö, "Effect of sampling frequencies on computation the maximum velocity of saccadic eye movements," *Biol. Cybern.*, Vol. 53, pp.67-72, 1985.
- 4) 김윤수, 박상희, "EOG 를 이용한 Corrective saccadic 안구운동의 특성", 대한의용생체공학회지, Vol. 2, No. 2, pp.21-29, 1981.
- 5) D.M. Young and K.T. Gregory, *A Survey of Numerical Mathematics*, Vol. 1, Reading, MA: Addison-Wesley, pp.350-361, 1972.
- 6) A.T. Bahill, J.S. Kallman, and J.E. Lieberman, "Frequency limitations of the two-point central difference differentiation algorithm," *Biol. Cybern.*, Vol. 45, pp.1-4, 1982.
- 7) A.T. Bahill and J.D. McDonald, "Frequency limitations and optimal step size for the two-point central difference derivative algorithm with application to human eye movement data," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. BME-30, pp.191-194, 1983.
- 8) R.W. Baloh, W.E. Kumley, and V. Honrubia, "Algorithm for analysis of saccadic eye movements using a digital computer," *Aviat. Space. Environ. Med.*, Vol. 47, pp.523-527, 1976.
- 9) R.W. Baloh, A.W. Sills, W.E. Kumley, and V. Honrubia, "Quantitative measurement of saccade amplitude, duration, and velocity," *Neurology*, Vol. 25, pp. 1065-1070, 1975.