

컴퓨터를 이용한 디지털방식의 눈의 신속운동속도의 측정

한 승 한

= 요약 =

새로 개발된 디지털신호를 이용한 안구운동속도의 측정법을 사용하여 안구진탕과 안구운동의 신속운동속도를 측정하였다. 안구진탕 및 신속안구운동의 속도측정을 위하여 대상안을 3CCD 비디오 카메라로 초당 30프레임씩 비디오 테이프에 기록하였으며, 각 프레임을 32BIT 개인용 컴퓨터로 디지털 프로세싱하여 시간대별로 안구의 운동거리를 도식화한후 안구운동의 속도를 계산하였다. 각 검사자의 오차를 알기위하여 같은 시간대의 기록을 두 검사자가 프로세싱하여 오차를 비교하였으며 그 오차는 3%이내였다. 새로운 신속운동속도의 측정방법은 비관혈적인 방법으로 대상을 측정하며, 디지털신호를 사용하여 잡신호에 의한 간섭을 받지않으며, 검사자간의 측정오차가 3%이내이며, 검사의 해상도가 1pixel(0.33mm)으로 비교적 작은 안구운동 까지도 측정이 가능하였다(한안지 36:1199~1206, 1995).

= Abstract =

Measurements of Ocular Saccadic Velocities ; Computerized Digital Video Measurement Technique

Sueng Han Han, M.D.

We have measured the saccadic velocities of nystagmoid and normal ocular movements. The ocular motions of normal subjects and of patients with nystagmus were videotaped using a 3 CCD(color) high resolution camera at 30 frames per second. 8.5-second video segments were selected for analysis. The data was processed digitally using a commercially available image analysis program in a standard 32-bit microcomputer. Measurements were replicated by two analysts. Saccadic velocities of each type of ocular movement were calculated and displayed. Measurement errors between observers and with

<접수일 : 1994년 11월 10일, 심사통과일 : 1995년 5월 10일>

연세대학교 의과대학 안과학교실

Department of Ophthalmology, College of Medicine, Yonsei University, Seoul, Korea

repeated trials were less than 3%. This new technique is non-invasive, efficient and requires only a camera to obtain video data. It has less noise than conventional methods because of the utilization of video lenses providing very good spatial resolution (1 pixel, 0.33mm), so motion range is much larger than pixel size (J Korean Ophthalmol Soc 36:1199~1206, 1995).

Key Words : Digital, Image analysis, Saccadic velocity, Video.

신속운동속도는 외안근의 근력과 직접적인 상관관계를 갖고있어서 외안근의 세기를 측정할 수 있는 척도로 널리 사용하고 있다¹⁾. 신속운동속도의 측정은 제한사시와 마비사시의 감별에 필수불가결한 검사이며, 마비사시에있어서 신속운동속도는 마비정도와 비례한다¹⁾. 신속운동속도측정을 위한 방법으로는 안근육에서 나오는 전기적 신호를 눈주위의 피부 혹은 공막에서 받아서 전기적 신호를 증폭하여 나타내는 방법과, 눈에 적외선 혹은 가시광선을 조사한후 반사된 광선을 센서로 감지한후 시간대별로 운동의 진폭을 나타내는 방법이 있다. 전자의 방법에는 Electro-oculography (EOG)²⁾, Magnetic search coil method³⁾ 등이 있으며, 이방법은 피부 혹은 공막에 전극을 접촉하여 안근수축시 발생하는 전기적 자극 혹은 자장의 변화를 증폭기로 받는 방법이다. 이 검사는 협조가 잘 되지않는 환자에 있어서 전극 부착에 어려움이 있으며, 아나로그신호를 사용함으로써 잡신호의 영향을 많이 받을 수 있는 단점이 있다²⁾. 후자의 경우 infrared limbus tracking method (IR)³⁾와 corneal reflection method (CR)^{4,5)}가 있으며, 반사된 빛을 감지하는 센서의 부착을 위하여 특수한 헬멧이나 얼굴고정틀이 필요하여 어린이에 있어서 사용이 곤란한 단점이 있다. 저자들은 좀더 비관혈적이고 아나로그신호의 잡신호를 제거하여 정확성을 높이기 위하여, 3CCD 비디오 카메라를 이용하여 안구운동을 녹화한 후 각 프레임을 32BIT 개인용 컴퓨터로 디지털 프로세싱하여 시간대별로 안구의 운동거리를 도식화한 후 안구운동의 속도를 계산하였다.

대상 및 방법

정상인의 수평신속운동과 격동안진 그리고 듀안증후군의 수평신속운동을 3CCD 비디오카메라로 녹화

하였다. 실험대상들은 편안한 자세로 앉힌 후 정면을 주시하게 하였다. 실험중 형광등으로 조명을 하였으며 그 조도는 일정하였다. 단안 혹은 양안을 구분간 SONY 3CCD 비디오카메라로 녹화하였으며, 비디오카메라의 셔터속도는 1/30초로 고정되었다. 수평신속운동을 유발하기 위하여 10도간격의 점프타게트가 사용되었다. 타게트를 환자의 전방 150cm에 위치시키고 카메라를 타게트의 뒤에서 환자 눈높이에 맞추어 촬영하였다. 타게트의 불빛은 작은 점멸 전구를 사용하였다.

대상1은 23세 남자로 이전에 어떤 안질환의 병력도 없었다. 10도 점프타게트를 이용하여 제일안위와 좌우측 10도방향으로 타게트를 따라보게하여 신속운동을 일으킨후 우안을 비디오녹화하였다.

대상2는 26세 남자환자로 주기변화안진이 있었으며, 110cm 거리에서 1개의 격자무늬의 넓이가 32 pixel이며 흑백격자의 대비가 33%인 square wave grating target (0.375cyc/deg)을 200mm/sec의 속도로 환자의 좌우측으로 돌린후 이것을 주시게하여 OKN반응을 일으킨후 우안을 비디오카메라로 녹화하였다.

대상3은 27세 여자환자로 좌안의 듀안증후군 1형으로 제일안위에서 외전장애가 있는 방향으로의 신속운동을 녹화하였다.

안구운동을 녹화한후 256화면(약 8.5초)을 취하여 자료분석을 하였다. 각각의 화면은 IBM 32BIT 컴퓨터에 장착된 frame grabber에 의하여 취해진 후 512×512개의 X, Y좌표로 치환되어 디지털화되었다. 각각의 화면상의 고정점과 이동점이 취해진 뒤 시간대별로 기록된후 도식화를 위하여 저장되었다. 이런 디지털 프로세싱과정은 JAVA (JANDEL INC.) 프로그램을 사용하였다. 화면상의 고정점으로 내외안각이 그리고 이동점으로는 동공중심이 채택되었다. 본 실험에 사용된 시스템의 구성요소와

그 특성은 그림1과 표1에 나타내었다.

실험자간의 오차를 알기 위하여 격동안진의 같은 시간대의 녹화자료를 서로 다른 두 실험자(숙련자, 비숙련자)가 디지털프로세싱하여 그 결과를 비교하여 통계학적 특징을 알아보았다(표2).

디지털프로세싱된 자료는 Excel 3.0 for Windows (Microsoft Corp.)을 사용하여 그 진폭을 각 시간대별로 도식화하였다. 이때 X축은 시간(초)을 Y축은 눈이 이동한 거리(pixel)를 나타내며 1pixel은 화면상 0.33mm이었다. 눈이 움직인 거리는 원주의 각도로 치환되었다($X^\circ = 4.77Dmm$, D=눈이 움직인 거리).

신속운동속도를 측정하기 위하여 측정할 구간의 두점을 취한 후 그 구간내의 점들의 회기방정식을 구하였다. 직선회기방정식의 기울기를 취하여 이 값을 위의 방식대로 원주각도로 치환하였고, 이때 실제의 눈의 크기와 화면상의 크기의 배율을 보정하여 신속운동속도를 계산하였다($^\circ/sec$).

측정오차의 정도를 알아보기위하여 도식화한 안구운동의 자료중 대상1과 2의 X, Y좌표 256점을 Fast Fourier Analysis하여 그 값을 각 진동 주파수별로 진폭을 도식화 하였다.

결 과

안구운동의 수평 및 수직움직임을 Fig. 2-4에 도식하였다. 도식상에서 위로 격인 부분이 안구운동의 우측 혹은 상측 움직임을 각각 나타내고있으며, 아래로 격인 부위는 좌측 혹은 하측 움직임을 보여주고 있다. 이것은 Electro-Nystagmography의 그래프의 결과와 일치시켜 판독상에 혼동을 덜고자 하였다. Fig. 2, 3에서는 측정오차와 잡신호의 특성과 안운동의 주파수대별로 진폭의 수준을 알아보기 위하여 Fast Fourier Transform을 시행하였다. 시행후 알기쉽게 나타내기 위하여 log변형을 하여 도식화 하였다.

대상1의 10도 점프타게트 주시후의 신속운동을 도식화한후(Fig. 2-a) 화살표 A-B부위를 확대하여 구간별 신속운동속도를 측정하였다(Fig. 2-c). 대상의 우안을 제일안위에서 좌측 10도를 보았을때의 신속운동속도는 181.27pixel/sec이었으며, 이경우 비디오로 녹화한 화면과 실제의 확대배율은 2였으며 이것을 대상 및 방법에서 언급한 방식대로 실제운동 각도로 환산한 결과 143.60 $^\circ/sec$ 이었다. 좌측 10도

Table 1. System Characteristics

Camera	Sony 3CCD, Model DXC-327
Video recorder	Sony EDV-9500(extended definition beta format)
Image processing software	JAVA for DOS(Jandel Inc.)
Data processing software	Excel 3.0 for Windows(Microsoft Corp.)
Hardware	
CPU1	386-based, generic IBM clone with frame grabber
CPU2	386sx microcomputer for calculations with Windows 3.1
Video monitor (pixels)	512×512

Table 2. Statistical features of data analyzed by different users

<i>Horizontal component by user 1</i>		<i>Horizontal component by user 2</i>	
Standard Error	0.45	Standard Error	0.47
Standard Deviation	7.17	Standard Deviation	7.51
Variance	51.42	Variance	56.36
Kurtosis	-0.83	Kurtosis	-0.99
Skewness	-0.14	Skewness	0.01
Range	28.39	Range	27.66
Count	256	Count	256

에서 제일안위를 보았을때의 신속운동속도는 191.94 pixel/sec이었으며, 이경우 비디오로 녹화한 화면과 실제의 확대배율은 2였으며, 이것을 실제운동각도로 환산한결과 152.02°/sec이었다. 위의 안운동중 수평운동만을 분리하여 그 측정값을 Fast Fourier

Transform을 시행한결과(Fig. 2-b), 약11Hz의 주파수대에서 안구운동 에너지양이 가장 많음을 알 수 있었으며, 약 1.6Hz, 2.5Hz, 4.0Hz에도 많이 분포하였다.

대상2의 OKN반응에 대한 안운동을 Fig. 3-a에서 보여주고 있으며, 두 검사자가 같은 구간을 2회 반복 측정한 결과, 그 오차는 1pixel 이내로(Table 2) 본 도표에서 보여주는 최대진폭(28pixel)의 3% 이내 이었다. OKN반응의 증속기 및 감속기의 속도를 측정하고자 수평 OKN반응을 보인 Fig. 3-a의 화살표 A-B구간을 확대하였다(Fig. 3-c). 증속기의 운동속도는 79.00pixel/sec이었으며, 이 경우 비디오로 녹화한 화면과 실제의 확대배율은 4배 였으며, 이것을 실제운동각도로 환산한 결과 32.04°/sec이었다. 감속기의 운동속도는 10.00pixel/sec이었으며, 이것을 실제 운동각도로 환산한 결과 3.55°/sec이었다. 위의 안운동중 수평운동만을 분리하여 그 측정값을 Fast Fourier Transform을 시행한 결과(Fig. 3-b), 약 10Hz, 5Hz, 1.6Hz의 주파수대에서 안구 운동 에너지양이 가장 많이 물려있음을 알 수 있었다.

대상3의 좌안의 신속운동을 Fig. 4에 도식하였다. 좌안이 내전시의 신속운동속도는 48.68pixel/sec이었으며 이는 확대율 1:1을 보정하여 77.14°/sec이었으며, 외전시의 신속운동속도는 18.31pixel/sec으로 28.99°/sec이었다. 외전시는 내전시의 속도의 37.58%로 신속운동속도는 감소되었으며 이는 제1형 듀안증후군의 임상적 소견과 일치하였다.

Fig. 1. Schematic Diagram for JAVA Image Analysis System(JANDEL Inc).

The captured images from CCD video-camera are digitized by frame grabber and analyzed by JAVA software in IBM personal computer.

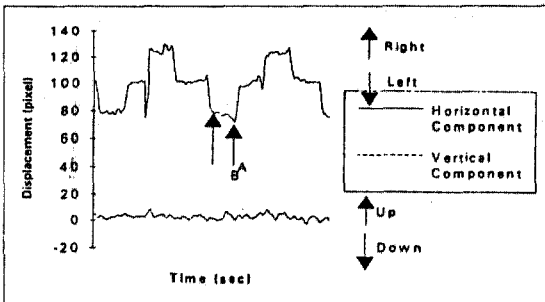


Fig. 2-a. Subject1, Horizontal and vertical components of 10 degree jump horizontal saccade, OD.

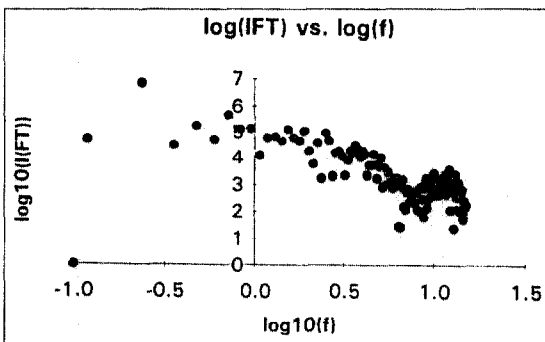


Fig. 2-b. Frequency domain(Fourier) of data in fig. 2-a(horizontal motion).

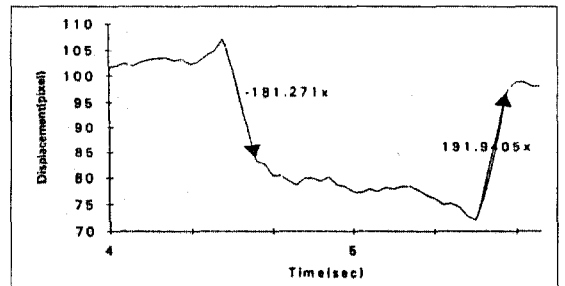


Fig. 2-c. Magnification of the arrow A-B area of fig 2-a, and the saccadic velocity of left 10 degree jump(181.27pixel/sec) and the right(191.94 pixel/sec).

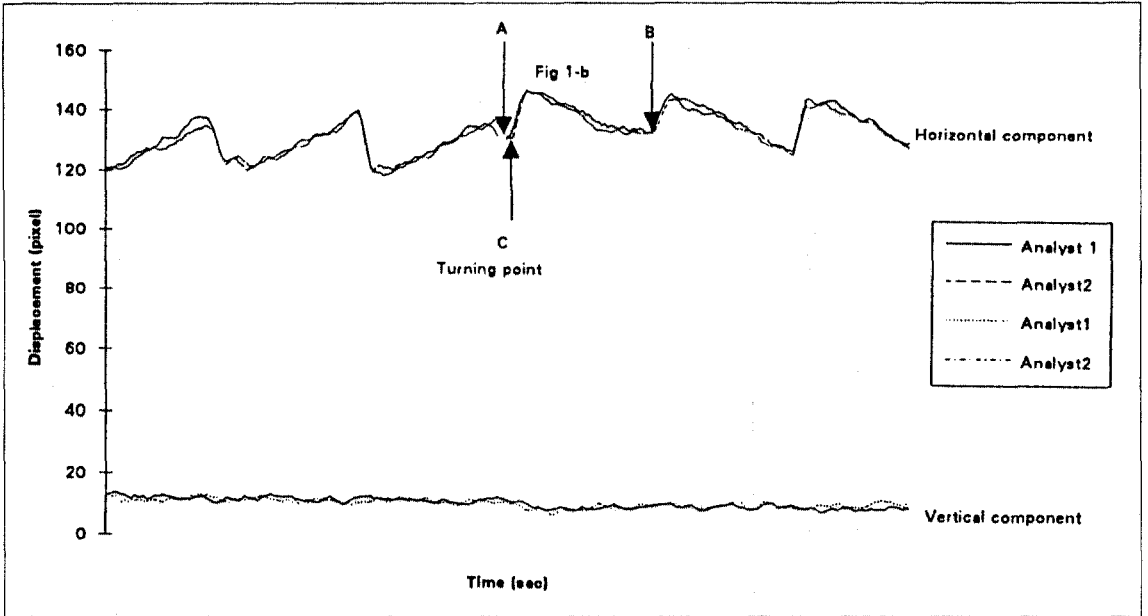


Fig. 3-a. Casel OD, Horizontal(top) and Vertical(bottom) components. ~1.67sec sawtooth waveform changes direction at turning point(arrow C).

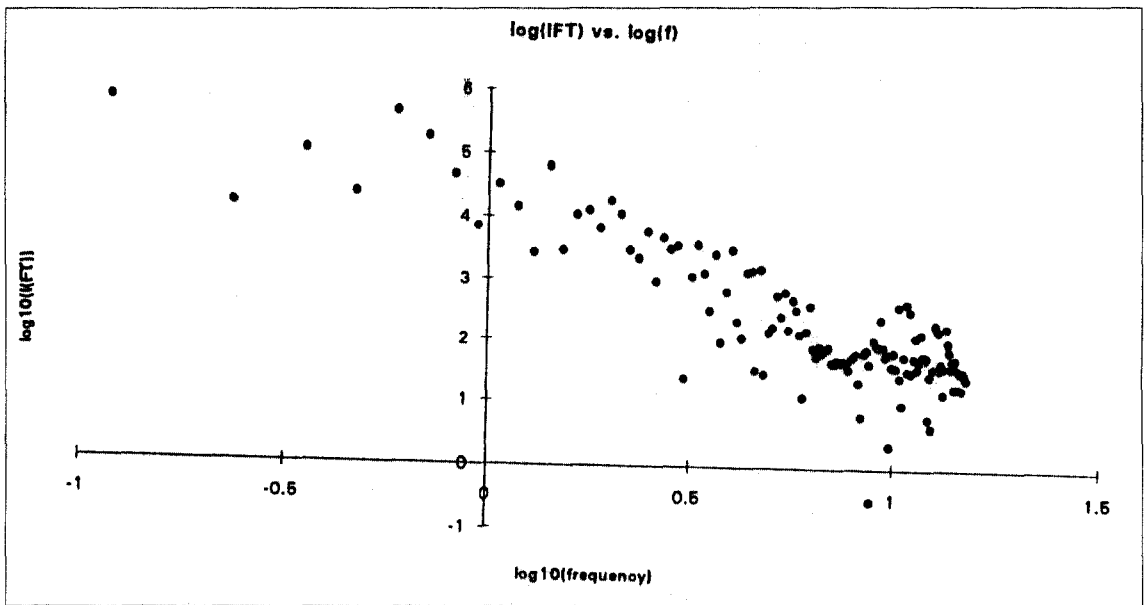


Fig. 3-b. Fast Fourier transform of horizontal component for fig. 2-a (analyst1).

고 찰

신속운동은 여러가지 형태의 안구운동에 적용될

수 있으며 신속운동속도측정은 빠른 안구움직임의 속도를 측정하는 술기이다. Metz 등은 Electro-oculography를 이용하여 마비된 외직근과 정상근의 신속운동속도를 측정하여 마비근의 신속운동속도

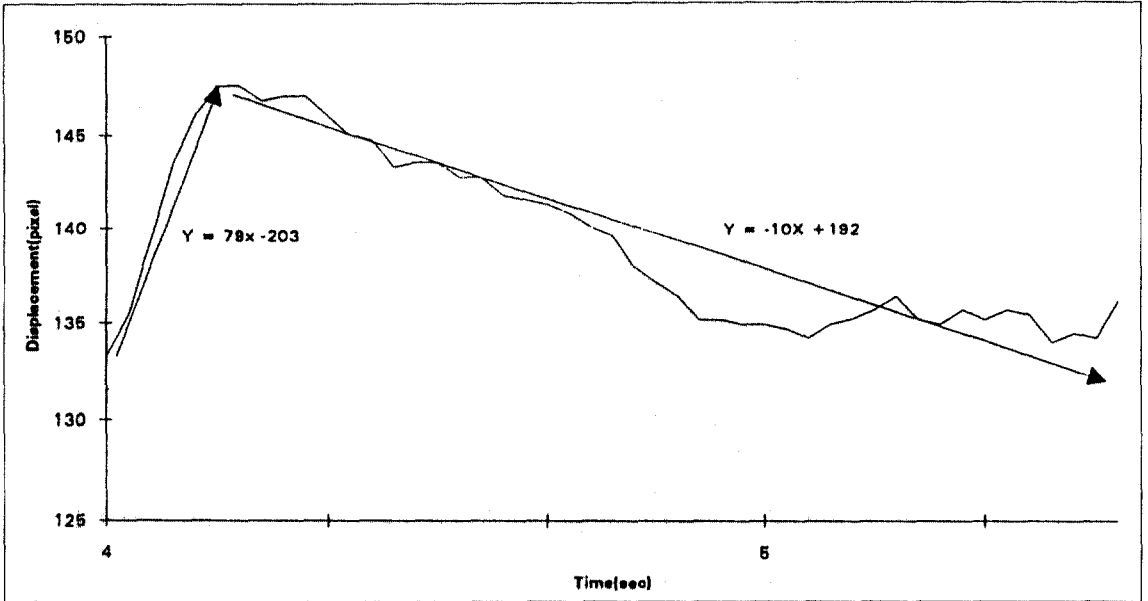


Fig. 3-c. Magnification of arrow A-B area in figure 3-a. Shows the different saccadic velocity of the fast (79pixel/sec) and slow (10pixel/sec) component of nystagmus.

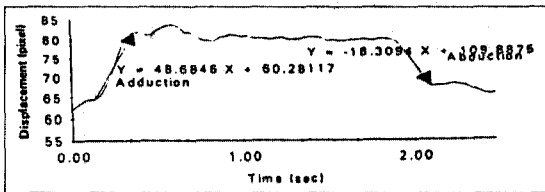


Fig. 4. Subject 3, horizontal component of saccadic movement, OS.

가 정상근에 비하여 유의있게 감소되어 있음을 보고 하였다⁶⁾. Metz는 안근육과 주변조직간의 섬유화 혹은 경축에 의해서 나타나는 제한사시에 있어서 침범된 안근육의 신속운동속도는 정상이며, 마비에 의한 사시의 경우 마비된 안근육의 신속운동속도는 감소된다고 보고하였다⁷⁾. Stathacopoulos 등은 Scleral search coil을 사용하여 상사근마비에서 수직신속운동속도는 정상안과 비교하여 유의있는 차이가 없다고 보고하였다.

마비사시와 제한사시의 수술적 치료는 서로 상이하기 때문에 이 두질환을 감별하는 것이 매우 중요하며 현재 알려진 확진방법 중 신속운동속도측정이 가장 신뢰할만 하다고 할 수 있다. 이 신속운동속도측정을 위한 안구운동의 추적방법에는 electro-

oculography, magnetic search coil method, infrared limbus tracking method, corneal reflection method 등이 있다. Electro-oculography는 피부에 전극을 댄후 안구운동시 안근육에서 나오는 전기적신호를 증폭하여 안구운동을 그래프화하는 방식으로 아날로그신호를 사용하기 때문에 외부의 잡신호에 영향을 받으며 땀이나 피부전극위치에 따라 피부의 전기저항치가 변하여 오차가 많이 발생할 수 있는 단점이 있다⁹⁾. 이런 아날로그신호에 의한 오차를 줄이기 위하여 Baloh 등은 electro-oculography를 사용하여 얻은 전기적신호를 컴퓨터에 연결하여 Fourier transform을 이용하여 분석하였으나, 이역시 전기신호 발생장치가 아날로그 방식이어서 완전 디지털화와의 거리가 멀다고 하겠다¹⁰⁾.

현재 사용하는 대부분의 electro-oculography는 위의 방식을 사용하여 신호발생은 아날로그식을 자료처리는 디지털식을 사용하고 있다. Longridge와 Pilley는 비디오화면에 electro-oculography를 삽입함으로써 시간대별 안구운동에서 실제움직임과 그래프를 동시에 관찰하였다¹¹⁾. electro-oculography는 일반적으로 가장 보편화된 방법이나 수직안운동

의 측정시 안검거근에서 나오는 전기신호와 상하직근에서 나오는 신호가 중복되어 두가지 안운동을 구분하는데 문제가 있다^{2,4)}. Magnetic search coil methods는 공막에 전극이 붙은 contact lens를 사용하여 안구운동시 나오는 근육의 자기장의 세기변화를 그래프화하는 방식으로 아나로그 방식을 채택한 것은 electro-oculography와 같으나 가장 근육 가까이서 신호를 받음으로서 정확하며, 또한 수직안운동시 안검거근의 신호를 배제하여 눈의 상하 움직임을 선별적으로 나타낼 수 있다^{8,9)}. 이 방법은 contact lens를 사용하여야 하므로 관혈적이며 특히 협조가 잘안되는 소아에 있어서 사용이 제한된다^{8,9)}. Infrared limbus tracking method, corneal reflection method는 안구운동의 기록과 자료의 분석이 디지털화되어 있으나 안구운동을 추적하는 센서의 부착을 위하여 헬멧이나 고정틀에 얼굴을 고정하여야하는 단점이 있다^{3,4,5)}. 최근들어 개인용 컴퓨터가 대중화되고 처리속도 및 용량이 증가함에 따라 안구의 회선운동을 비디오와 컴퓨터를 이용하여 측정하려는 시도들이 보고되고 있다^{12,13,14)}. 이에 저자는 대중화된 비디오카메라로 안구운동을 녹화한후 초당 30 frame의 비디오화면을 frame grabber로 디지털화한 후 안구운동의 진폭을 시간대별로 electro-nystagmography와 같은 방식으로 도식화한 후 필요로 하는 안구운동의 신속속도를 측정하였다. 결과에서 언급했듯이 화면상의 눈의 속도인 pixel/sec는 원주각도로 치환되어 °/sec로 표시되었다. 이 방식으로 속도를 측정할 경우 이 검사의 오차의 한계인 1pixel(0.33mm)/sec은 1.58°/sec이다. 또한 최소측정진폭은 0.33mm로써 이런 오차를 더욱 줄일 수만 있다면 미세안진의 연구에도 활용할 수 있으리라 생각된다. Fig. 2-b와 3-b에서 11, 10Hz대에 많은 에너지가 몰려있는 것으로 미루어 11, 10Hz의 빠르고 작은진폭의 움직임이 측정오차가 아닌 미세안진일 가능성을 시사한다고 할 수 있으며 추후 reverse Fourier transformation을 이용하여 그래프를 재구성해 보면 좀더 정확히 알 수 있으리라 생각된다.

상기의 방법을 이용하여 안운동을 측정하는데는 아래와 같은 잇점이 있다고 하겠다.

첫째, 비관혈적이며 따라서 협조가 잘안되는 환자

의 경우도 검사가 용이하다.

둘째, 디지털신호를 사용하므로 외부잡신호가 끼여들 소지가 없으며, 비디오 테이프만 있으면 언제라도 재구성이 가능하며 확대를 해도 잡신호의 증폭이 되지 않는다.

셋째, 안근육에서 나오리라 추정되는 전기신호를 비특이적으로 받는 방법과는 상이하게 직접 눈의 움직임을 측정하며, 기타 안검거근의 영향을 받지 않는다.

넷째, 수평 수직운동을 동시에 측정가능하며 회선운동의 추가도 가능하다.

다섯째, 어떤 머리의 위치라도 눈만 비디오에 잡히면 가능하다.

여섯째, 최소측정허용치가 1.58°/sec, 0.33mm으로 향후 미세안진의 연구에 합당하리라 생각된다.

이런 장점과 반면에 해결해야 할 문제점으로는 다음과 같은 사항이 있다.

첫째, 눈을 감은 경우 측정이 불가하다. 이 문제점은 고도의 프로그램기술과 하드웨어의 기능향상으로 삼차원 그래픽을 이용하면 해결되리라 본다.

둘째, 본 연구에서 사용한 카메라는 대중용으로 셔터속도는 1/30초에 고정되어 15Hz 이상의 빠른 안구움직임은 측정이 불가하나, 고속셔터를 사용하여 용량이 큰 컴퓨터를 이용하여 해결할 수 있다.

셋째, real time processing이 본 저자가 사용한 개인용 컴퓨터로는 불가하였으나, 좀더 빠른 CPU의 사용과 RAM drive 및 Fast hard drive의 사용으로 보완하고 화면압축 및 연산을 위한 보드의 제작으로 연산 및 그래프의 속도를 증진시킬 수 있으리라 생각된다. 현재 여러분야에서 각광을 받고있는 pattern recognition 기법을 활용하면 좀더 오차를 줄이고, 빠른 안구운동과 속도측정을 가능하게 할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- 1) Metz HS : Saccadic velocity measurements in strabismus In : Tasman W, ed. Duane's Clinical Ophthalmology. 2nd ed, vol 1 chapter 21, Philadelphia, J.B. Lippincott Co, 1991, pp. 1-13.
- 2) Yee RD, Schiller VL, Lim V, Baloh FG,

- Baloh RW, Honrubia V : *Velocities of vertical saccades with different eye movement recording methods. Invest Ophthalmol* 26:938-944, 1985.
- 3) Crane HD and Steele CM : *Generation-V dual-Purkinje-image eyetracker. Applied Optics* 24(4):527-537, 1985.
- 4) Jones R : *Two dimensional eye movement recording using a photo-electric matrix method. Vision Res* 13:425-431, 1973.
- 5) Crane HD and Steele CM : *Accurate three-dimensional eyetracker. Applied Optics* 17(5):691-705, 1978.
- 6) Metz HS, Scott AB, O'Meara D and Stewart HL : *Ocular Saccades in Lateral Recrus Palsy. Arch Ophthalmol* 84:453-460, 1970.
- 7) Metz HS : *Restrictive Factors in Strabismus. Surv Ophthalmol* 28(2):71-83, 1983.
- 8) Stathacopoulos RA, Yee RD and Bateman JB : *Vertical Saccades in Superior Oblique Palsy. Invest Ophthalmol Vis Sci* 32:1938-1943, 1991.
- 9) Collewijn H, Mark F, and Jansen TC : *Precise recording of human eye movements. Vision Res* 15:447-450, 1975.
- 10) Baloh RW, Langhofer L, Honrubia V and Yee RD : *On-line Analysis of Eye Movements Using a Digital Computer. Aviation Space Environ Med* 51(6):563-567, 1980.
- 11) Longridge NS and Pilley SFJ : *Superimposition of ENG Recording on Video Eye Movements(Congenital Nystagmus). Adv. Oto-Rhino-Laryng* 42:85-89, 1988.
- 12) Young LR, Lichtenberg BK, Arrott AP, Crities TA, Oman CM and Edelman ER : *Ocular torsion on earth and in weightlessness. Annals New York Academy of Sciences* 81-92, 1981.
- 13) Curthoys IS, Moore ST, McCoy SG, Halmagyi GM, Markham CH, Diamond SG, Wade SW and Smith ST : *VTM- a new method of measuring ocular torsion using image processing techniques. Annals New York Academy of Sciences* 826-828, 1992.
- 14) Yamanobe S, Taira S, Morizono T, Yagi T and Kamio T : *Eye movement analysis system using computerized image recognition. Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 116:338-341, 1990.