

# 전정안구반사를 이용한 평형감각 평가용 시뮬레이터의 개발

\*임승관, \*김규겸, \*정호춘, \*진달복, \*\*김민선, \*\*박병립  
\*원광대학교 전자공학과, \*\*원광대학교 의과대학 생리학교실  
전북 익산시 신용동 344-2  
limsk@inote.com

## Development of Simulator for Evaluating Balance by Using Vestibuloocular Reflex

\*S.K. Lim, \*H.C. Jeong, \*G.K. Kim, \*D.B. Jin, \*\*M.S. Kim, \*\*B.R. Park  
\*Department of Electronics Engineering, Wonkwang University  
\*\*Department of Physiology, Wonkwang University School of Medicine  
344-2, Shinyong-Dong, Iksan, 570-749  
limsk@inote.com

### Abstract

The purpose of this study was to develop a sinusoidal rotatory chair system for evaluating the vestibular function in patients suffered from vertigo with vestibular disorders. The sinusoidal rotatory chair system is composed of a rotatory chair system and softwares. Maximum velocity of the rotatory chair was upto 60 degree per second and frequency range was 0.01 to 0.64 Hz.

To evaluate the vestibular function in vertigo patients, vestibuloocular reflex was measured by sinusoidal rotation of the whole body about vertical axis in the darkness, and optokinetic nystagmus, visual vestibuloocular reflex, and visual suppression test were also performed. Eye movement was measured by means of a electronystgmograph amplifier through Ag-AgCl surface electrodes. Gain, phase, and symmetry were obtained from analysis of the eye movement induced by vestibular or visual

stimulation. In healthy adults, sinusoidal rotation of the whole body produced nystagmus, of which gain was directly proportional to the velocity of stimulation. The gain of visual vestibuloocular reflex was greater than that of vestibuloocular reflex or optokinetic nystagmus, and it was suppressed markedly by visual suppression test.

These results suggest that the sinusoidal rotatory chair system which was developed by this study can evaluate the vestibular function quantitatively, also this system is very useful to diagnose the vertigo patients with vestibular disorders and to estimate the vestibular function during recovery from vertigo.

### 서 론

자세의 조절 및 평형은 내이에 위치한 전정기관, 시각계, 고유수용계 등의 구심성 신호가 뇌간의 전정 신경핵을 통하여 이루어진다[1]. 특히 내이에 위치한

전정기관은 각가속운동에 반응하는 반규관과 선 가속 운동에 반응하는 이석기관으로 구성되어 전정안구반사와 전정척수반사를 초래하여 반사적인 자세의 조절에 중요한 역할을 한다[2]. 전정안구반사는 개체의 회전자극에 반응하는 전정수용체로부터 발생한 구심성신호가 Scarpa's ganglion과 전정신경을 경유하여 뇌간에 위치한 전정신경핵에 도달한 후 안구운동신경핵에 전달되어 외안근의 수축을 초래하므로써 회전자극과 반대 방향으로 안구운동을 유발하여 회전운동 중에도 전방의 물체를 망막에 일정하게 고정시켜 자세의 조절에 관여한다[3-6]. 그리고 전정척수반사는 전정수용체로부터 전정신경핵에 전달된 구심성신호가 척수를 하행하여 척수전각의 운동뉴론에 도달한후 골격근의 수축을 조절하므로써 자세의 조절에 관여한다[7-8]. 그러나 일측 전정기관의 손상은 오심, 구토, 현기증, 자발안진, 자세부조화 등을 동반한 전정증상을 초래하며, 양측 전정기관의 손상은 시각이 차단된 상태나 빠른 회전운동시 자세의 조절이 불가능하게 된다[9]. 이러한 전정기능의 상실은 현재 점차 증가추세에 있으며, 현기증의 가장 많은 원인으로 알려져있다[10]. 따라서 현기증의 원인을 규명하기 위해서는 전정기능의 평가가 필수적으로 수반되어야하기 때문에 최근 전정기능의 검사법이 점차 중요시 되고있다. 현재 우리나라에서 현기증을 진단하기 위한 전정기능의 검사법은 외에도 운동자극을 가하여 안구운동을 육안적으로 관찰하는 방법이 널리 이용되고 있으나 전정기능의 정량적인 평가가 불가능하다[11].

본 연구에서는 전정기능을 정량적으로 평가하기 위하여 자연상태에서와 유사한 자극을 전정기관에 가할 수 있는 회전자극시스템[12]과 안구반응을 분석할 수 있는 안구운동분석시스템을 개발하고자 하였다. 회전자극에 의하여 일측의 전정기관을 흥분시키거나 억제시킬 수 있는 평형감각 평가용 시뮬레이터는 회전운동을 제어하기 위한 서보제어기와 컴퓨터시스템, 그리고 제어신호의 생성과 신호의 저장 및 분석을 위한 운용 프로그램으로 구성하였다. 안구운동의 분석을 위해서는 안구신호로부터 얻어진 안구속도 신호를 FFT처리하여 안구운동의 이득과 위상 및 대칭성을 산출하였다.

## 회전자극 시스템의 개요

평형감각 평가를 위하여 자연상태와 유사한 상황에서 전정기능을 평가할 수 있는 방법으로 정현파 회전자극하는 것이다[12-13]. 시뮬레이터는 환자를 수직축을 중심으로 의자에 앉힌 상태에서 좌측과 우측 방향으로 다양한 속도의 회전자극을 가하여 주로 전정기관의 수평반규관을 자극하였을 때 발생하는 안구운동을 분석하여 전정안구반사를 평가하는 것이다.

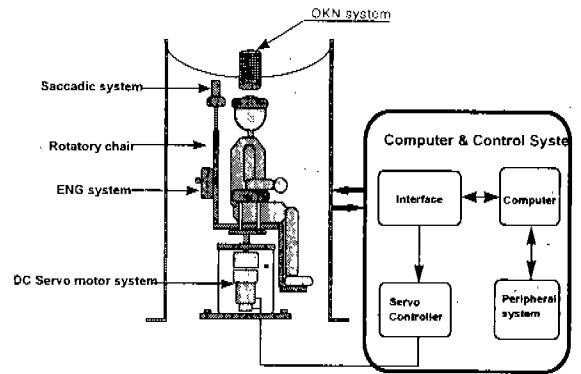


그림 1. 정현파 회전자극시스템의 전체 구성도  
Fig. 1. Configuration of sinusoidal rotatory chair system

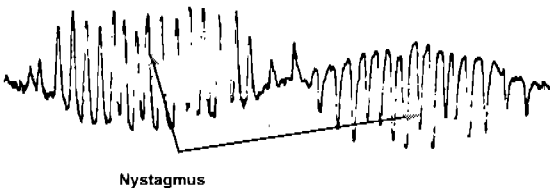
개체의 회전자극에 의하여 유발된 전정안구반사(VOR; vestibuloocular reflex)는 우측 방향의 회전자극에 의하여 속상이 우측을 향하는 안진이 발생하고, 좌측 방향 회전시에는 좌측을 향하는 안진이 발생한다. 회전자극은 저주파수 영역인 0.01 ~ 0.2 Hz와 중주파수 영역의 0.2 ~ 1.0 Hz, 고주파수 영역인 1.0 ~ 5.0 Hz까지 검사하게 되는데, 기계적인 한계와 자극속도에 대한 안구운동의 추종 한계성 때문에 대부분의 경우 0.01 ~ 1.0 Hz이내에서 검사한다.

그림 1은 시뮬레이터의 회전자극기 구성도를 나타낸 것으로써, 회전자극기의 전반적인 제어와 신호의 저장과 분석을 위한 컴퓨터 시스템 및 인터페이스 장치와 구동장치, 그리고 전기안전기록용 증폭기(ENG amplifier), 시운동성 자극장치(optokinetic stimulator)

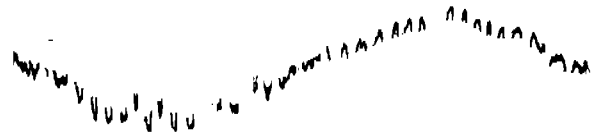
와 기타 기계적인 장치로 구성하였다.

신호분석 알고리즘

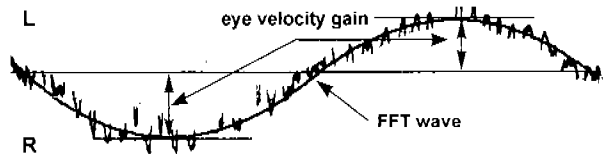
정현파 회전자극기를 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64 Hz의 주파수로 회전자극하여 유발된 안구신호는 ENG 증폭기를 거치면서 안구의 속도신호와 위치신호를 발생한다. 그림 2(a)은 정상인을 본자극기를 이용하여 0.08 Hz로 한 주기 회전자극했을때 안구의 속도신호이고, 그림 2(b)은 그림2(a)의 안구속도신호에서 안진을 제거한 안구속도 파형이다. 안진을 제거하는 방법은 신호의 주기에 따라 안구속도신호의 최대지점을 기준으로 영역을 설정한 후 안진을 제거하므로써 그림 2(b)와 같은 데이터를 얻을 수 있었다. 여러주기의 파형을 반복하여 주기별로 자르고 안진을 제거한 후 얻어진 그림 2(b)와 같은 파형을 각 회전주기별로 잘라 같은 축선상에 중첩시키고, 이때 중첩된 데이터를 FFT 과정을 거쳐 회전자극기의 자극속도와 여러주기의 안구속도 신호의 평균된 안구속도값을 그림 2(c)와 같은 파형으로 부터 얻을 수 있었다. 이러한 과정으로부터 얻어진 안구운동속도 신호는 표준화검사(calibration)에서 얻어진 값을 전기안진기록기의 특성식에 대입하여 안구운동속도값을 구할 수 있고, 안구운동속도값을 회전자극기의 최대 속도값과 비교하면 안구운동의 이득을 얻을 수 있다. 또한, 안구운동속도신호와 회전자극기의 회전속도를 비교하면 위상을 산출할 수 있고, 회전과 역회전시 발생하는 안구신호에서 이득차의 비를 산출하여 대칭성을 구할 수 있다.



(a) 정현파 회전자극하였을때 출현한 안구운동(Nystagmus)속도의 신호  
(a) Velocity signal of eye movement (Nystagmus) induced by sinusoidal rotation



(b) 안구운동속도의 신호로부터 안진을 제거한 파형  
(b) Waveform which eliminated nystagmus from velocity signals of eye movement



(c) 안구속도 신호의 FFT 변환  
(c) FFT transformation of eye velocity signals

그림 2. 안구운동 속도의 분석

Fig. 2. Analysis of velocity of eye movement

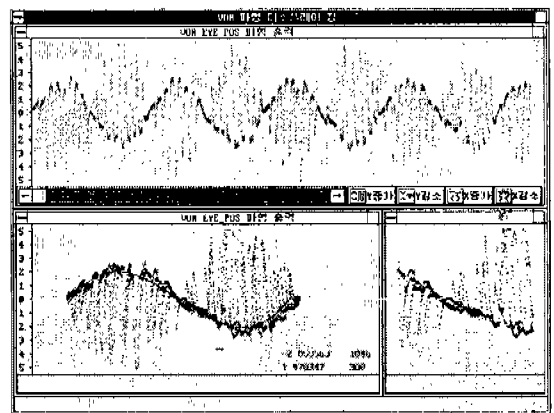


그림 3. 안구신호의 분석모드

Fig. 3. Analytic mode of signal of eye velocity

이와같은 측정에 의하여 얻어진 이득, 위상, 대칭성의 비정상범위는 정상 평균수치보다 2 표준편차치 밖으로 벗어날 때이므로 평형기능의 상태를 쉽게 평가할 수 있다. 그림 3은 안구신호의 분석모드를 보여준다.

실험결과 및 고찰

## 1. 실험방법

본 연구의 시뮬레이터와 이미 상품화된 안구운동 기록시스템을 이용하여 성능을 평가할 목적으로 본 시스템의 컴퓨터기록 프로그램과 Sensomedics Co.에서 생산된 생체신호기록기(physiograph: Dynograph Recorder R511)를 사용하여 안구신호를 검출하였다. 안구신호 검출용 전극은 0.875" × 1.75" 크기의 Ag-AgCl 표면전극(WPI, EL203)을 사용하였으며, 우측 안구의 안외각췌피(lateral epicanthus)에 탐색전극을, 좌측의 안외각췌피에 무관전극을, 이마의 정중앙 부위에 접지전극을 부착하였다. 안구운동을 기록하기 위하여 피검자에게 전극을 부착한 후 피검자의 머리를 앞으로 45도 가방 숙여 반구관이 수평상태를 유지하도록 하여 더욱 강한 자극을 얻을 수 있도록 하였으며, 약 10분 동안 앞에서 언급한 원형부스의 암실에서 적응시킨 후 전정안구반사의 억제를 방지하기 위하여 검사시간 동안 간단한 숫자계산이나 질문에 대한 답변 등으로 낮은 의식상태를 유지하도록 하였다. 안구운동 파형은 안구가 탐색전극 방향으로 회전하면 상방을 향하고 무관전극 방향으로 회전하면 하방을 향하도록 하였다. 회전자극기의 위치파형은 자극기가 우측으로 회전할 때 상방으로, 좌측으로 회전할 때는 하방으로 향하도록 하였다. 방향이 바뀌는 위상의 -270° 지점과 +90° 지점의 속도는 0° / sec의 정지상태이며 사인(sine) 0° 과 180° 지점은 최대속도점임을 의미한다. 그림 9는 정상성인에서 0.08Hz의 회전자극을 가하였을 때 출현한 안구운동을 상품화된 생체신호기록기(physiograph: Dynograph Recorder R511)에 의하여 기록한 것으로 본 연구의 회전자극 시스템에 의한 안구운동[그림 6]과 비교하면 모두 동일함을 보여준다.

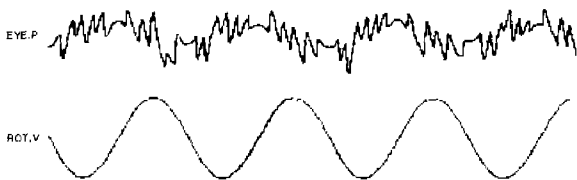


그림 4. 생체신호 기록기를 이용하여 기록한 안구운동  
Fig. 4. Eye movement recorded by physiograph

## 2. 표준화검사 (Calibration)

피검자의 안구로부터 유입된 안구신호의 이득은 안구운동과 직접적인 관계가 있기 때문에 측정된 신호로부터 안구의 이동각도와 위치를 산출할 수 있는데, 전극의 위치는 피부저항, 전극의 접촉저항 등의 요인이 전기안진기록기 증폭기의 신호 이득을 변화시킬 수 있으므로 안구의 운동량을 직접 측정할 수 없다. 이러한 이유로 각 피검자에서 안구운동량의 표준이 되는 기준치가 필요하게 되고 이를 위하여 표준화검사 과정을 거치게 된다.

표준화검사의 방법으로는 피검자의 안구가 정면에서 정해진 각을 이동하는 광점을 주시하므로써 정해진 광점의 이동각에 대한 안구운동과형의 높이가 결정된다. 이러한 과형의 높이는 신호분석의 표준치로 이득을 산출하는데 기준이 된다. 광점을 만들기 위한 장치로는 레이저 인디케이터를 사용하였으며, 3 mm의 지름을 가진 광점으로 650 nm의 파장을 갖는 반도체 레이저를 사용하였다. 이 광점을 주기적으로 좌우측의 30° 범위를 이동시켜 안구신호에 대한 전기안진기록용 증폭기의 전기신호를 각도에 비례한 이득값으로 변환하여 표준화검사를 하였다. 그림 5은 표준화검사장치를 이용한 안구운동을 표시한 것으로 안구가 좌측과 우측으로 각각 15° 씩 이동하였을 때 기록된 안진곡선의 파형으로 안구가 우측을 향하면 파형은 상방을, 좌측을 향하면 하방을 향하였다.

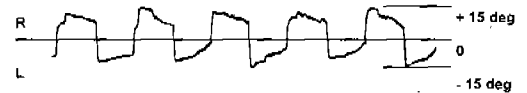


그림 5. 레이저 인디케이터를 좌우측으로 15° 회전하여 얻어진 안구운동의 표준화검사 신호  
Fig. 5. Calibration of eye movement by using laser indicator at degree of 15

## 3. 전정안구반사(VOR)

전정기능을 평가할 목적으로 원통 부스내에 설치된 회전자극시스템의 의자에 피검자를 앉힌 후, 0.01 -

0.64 Hz의 자극주파수로 3 ~ 6회의 범위에서 정현파 회전자극을 가하였다. 회전자극시 전정기관의 수평반 규관을 선택적으로 자극하기 위하여 환자가 회전의자에 앉은 상태에서 두부를 30° 전방으로 굽힌상태에서 [14] 고정한 후 좌측과 우측으로 회전시켜 전정안구반사를 유발하여 안구신호를 검출하였다. 회전자극기의 최대 회전자극속도 설정은 60°/sec의 속도로 정현파 자극을 하였고, 이때 안구신호의 샘플링 주파수는 125, 256, 512 Hz의 세종류를 사용하였으며, 전기안진기록계의 증폭률은 20,000배로하였다. 그림 6은 정상 성인에서 0.08 Hz의 회전자극을 가하였을 때 출현한 안구운동을 기록한 것으로 좌측 방향의 회전자극에 의하여 안진의 속상은 좌측을, 서상은 우측을 향하였으며, 우측 방향의 회전자극에 의해서는 안구운동의 방향이 반대로 역전되었다.

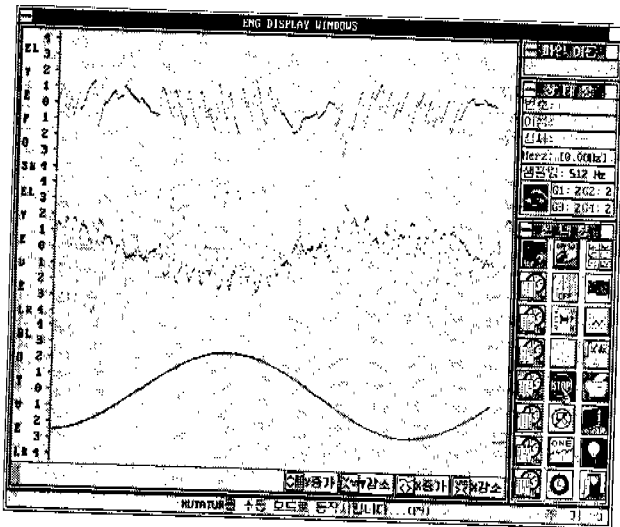


그림 6. 0.08 Hz의 회전자극에 의한 안구신호  
Fig. 6. Signal of eye movement induced by sinusoidal rotation of 0.08 Hz

#### 4. 검사결과

평형감각 검사의 결과는 이득, 위상, 대칭성으로 분석하며, 전정안구반사에서 그림 7과 같은 그래픽 결과를 얻었다.

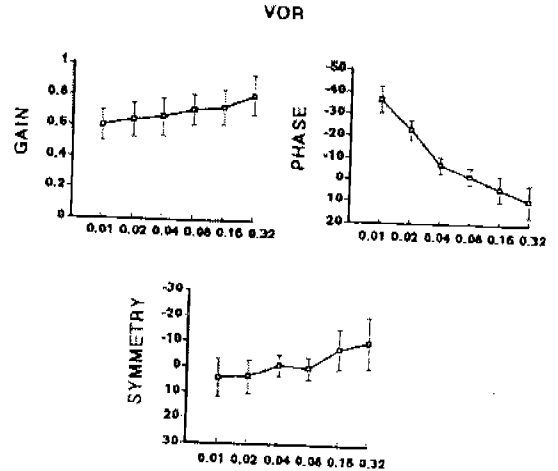


그림 7. 전정기능 검사결과  
Fig. 7. Testing result of vestibular function

#### 결 론

본 연구에서 구현한 평형감각 평가용 시뮬레이터의 구동성능 및 검사의 신뢰도 등을 분석하기 위하여 구동특성 시험과 검사성적의 평가를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 평형감각의 평가를 위해서는 높은 주파수 영역까지 광범위한 회전자극이 필요하지만, 본 시스템에서는 정격 회전속도가 3,000 RPM인 DC 서보모터를 사용하여 자극 주파수가 최대 1.0 Hz까지 가능하였으며, 최대 자극속도가 180°/sec의 정현파 회전자극 특성을 갖는 시스템을 구현하였다.
- (2) 회전자극에 의하여 안진이 출현하였고, 안진의 방향은 회전자극의 방향과 일치하였으며 안구운동의 속도는 회전자극의 속도에 비례하였다.
- (3) 회전자극 주파수가 증가함에 따라 이득과 대칭성은 증가하였으며, 위상은 감소하였다.
- (4) ±15°의 광원이 움직이는 표준화검사를 시행하였을 때 안구의 움직임에 비례하는 구형파의 안구신호가 발생하였으며, 안구운동의 이득과 비례적인 관계로 일치하였다.

이상의 결과는 본 연구에서 개발한 평형감각 평가용 시뮬레이터가 평형기능을 정량적으로 평가할 수 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. V.B. Brooks, The neural basis of motor control, New York, Oxford University Press, pp.160-180, 1986.
2. V.J. Wilson and G. Melvill Jones, Mammalian vestibular physiology, New York, Plenum, pp41-76, 1979.
3. J. Szentagothai, "The elementary vestibulo-ocular reflex arc", J Neurophysiol, Vol. 13, pp395-407, 1950.
4. B. Cohen, J. Suzuki and M.B. Bender, "Eye movement from semicircular canal nerve stimulation in the cat", Ann Otol Rhinol Laryngol, Vol. 73, 153-169, 1964.
5. M. Ito, N. Nishimaru and M. Yamamoto, "The neural pathways mediating reflex contraction of extraocular muscles during semicircular canal stimulation in rabbits", Brain Res, Vol. 55, no. 1, pp183-188, 1973.
6. J.H. Kim, B.R. Park and C.S. Park, "Studies on the interrelationship between the vestibular semicircular canals and extraocular in rabbit and cats", Korean J Physiol Vol. 21, no. 1, pp91 - 101, 1987.
7. V.J. Wilson and B.W. Peterson, "Vestibulospinal and reticulospinal system", In: Handbook of physiology. The nervous system, edited by HH Kornhuber, Berlin, Springer-Verlag, pp 667-702, 1981.
8. V.J. Wilson, R.H. Schor, I. Suzuki and B.R. Park, "Spatial organization of neck and vestibular reflexes acting on the forelimbs of the decerebrate cat", J Neurophysiol, Vol. 55, no. 3, pp514-526, 1986.
9. W. Precht, H. Shimazu, C.H. Markham, "A mechanism of central compensation of vestibular function following hemilabyrinthectomy", J Neurophysiol, Vol. 29, no. 6, pp996-1010, 1966.
10. T. Brandt, Vertigo: Its multisensory syndromes, New York, Springer-Verlag, pp1-24, 1991.
11. H.O. Barber and C.W. Sto, "Preparations for testing. In: Manual of electronystagmography", St. Louis, The CV Mosby Co, pp159-187, 1980.
12. A. Herman, Jenkins and Jefim Goldberg, "Test-Retest Reliability of the Rotatory Test in Normal Subjects ", Adv Oto-Rhino-Laryng. Vol. 41, pp190 - 195, 1988.
13. U.W. Buettner, V. Henn and L.R. Young, "Frequency response of the vestibuloocular reflex in the monkey", Aviat Space Environ Med, Vol. 52, pp73-77, 1981.
14. I.S. Curthoys, P.H.I. Blanks and C.H. Markham, "Semicircular canal functional anatomy in cat, guinea pig and man ", Acta Otolaryngol, Vol. 83, pp258-265, 1977.
15. I.P. Howard, "The optokinetic system In: the vestibuloocular reflex and vertigo", edited by J.A. Sharpe and H.O. Barber, New York, Raven Press, pp163-184, 1993.