

# 전정기능 평가를 위한 탈수직축 회전자극 시스템 및 HMD 시스템의 개발

金圭謙, 高宗宣, 朴炳林, 金仁東

Development of the off-vertical rotatory chair and visual stimulation system for evaluation of the vestibular function

Gyu-Gyeom Kim, Jong-Sun Ko, Byung-Rim Park, In-Dong Kim

## 요 약

전정기관은 내이에 존재하며 유연한 동작과 몸의 자세 그리고 운동을 조절한다. 이 기관은 회전 가속도를 감지하는 세반고리관과 선형 가속을 감지하는 이석기관으로 구성된다. 이러한 기관의 생체 신호로부터 의사는 사람이 환자인지를 판단한다. 이 신호의 데이터를 얻기 위해서 회전의자 한쪽을 들어올려 최대 30도까지 기울인 상태에서, 회전제어하게 되는데, 이 경우 부하의 불균형으로 인한 불평형 부하를 제거하고, 생체신호의 측정을 위하여 robust 제어가 요구된다. 본 연구에서는 자세조절기능에 대한 이석기관의 역할을 추구하기 위하여 탈수직축 회전자극기를 개발하였으며, 공간을 차지하고 다양한 시각패턴을 만들지 못하는 기존 시각자극시스템의 단점을 해결하기 위하여 HMD를 이용한 시각자극 시스템을 개발하였다. 더구나 노이즈에 취약한 아날로그 신호인 ENG 신호의 전송문제를 해결하기 위하여 근거리 R/F 무선시스템으로 개발하였다. 이상의 제안된 시스템을 제작하고 실험한 결과를 보고하였다.

## ABSTRACT

The vestibular system located in the inner ear controls reflex body posture and movement, It has the semicircular canals sensing an angular acceleration and the otolith organs sensing a linear acceleration. With this organic signal, medical doctor decide if a person has disease or not. To obtain this data, a precision stimular system is considered. Robust control is needed to obtain eye signals induced by off-vertical axis rotation because of an unbalanced load produced by tilting the axis of the system upto 30 degrees. In this study, off-vertical axis rotatory system with visual stimulation system are developed. This system is consisted of head mounted display for generating horizontal, vertical, and three dimensional stimulus patterns. Furthermore wireless recording system using RF modem is considered for noiseless data transmission. Detailed data was described.

**Key Words** : Vestibular system, Off-vertical axis rotation, Visual stimulation, Robust control

## 1. 서 론

요즘 공학에서 사용되는 많은 이론과 기술이 의학적으로 필요한 기술로 접목되어지고 있으며, 이러한 분야를 의공학이라 한다. 특히 의학용 데이터를 만들어 내는 데에는 각 조건에 맞게 인체기관에 자극을 가하고 그 반응을 유발시켜 필요한 데이터를 수집하게 된다. 안구운동을 이용하여 자세조절기능을 평가하기 위하여 회전자극과 시각자극을 이용한 방법이 널리 이용

되고 있는데<sup>[1]</sup>, 회전자극을 위한 시스템은 회전의자와 HMD(head mounted display)로 구성되며, 효율적인 회전자극시스템을 개발하기 위해서는 전력전자의 모터 제어 기술과 저전력 고이득 증폭기, 그리고 무선시스템을 이용하는 안전신호 측정기에 대한 연구가 요구된다.

회전의자는 PMSM(permanent magnet synchronous machine)의 고강성 제어의 전력전자 기술에 의해 구동되고, HMD는 컴퓨터의 direct-x 기술을 이용하여 다

양한 패턴을 발생시키며, 이 두 제어는 일치되어야 한다. 내이에 위치한 전정기관은 각가속운동에 관여하는 반규관과 선가속운동에 관여하는 이석기관으로 구성되어 있기 때문에 자세조절에 대한 반규관의 기능을 평가하기 위해서는 개체의 수직축을 중심으로 회전자극하여 주로 수평 반규관을 자극하는 방법(yaw rotation)을 많이 사용하며, 이석기관의 기능을 평가하기 위해서는 선운동을 이용하거나 탈수직축 회전자극(off-vertical axis rotation)을 이용한다. 탈수직축 회전은 PMSM으로 구동되는 회전의자의 한쪽을 들어 올리며, 회전시킴으로써 가능하게 된다. 이 경우 부하의 불균형으로 불평형 부하가 인가되는데, 생체신호의 측정을 위하여 robust 제어가 요구된다<sup>[2][3]</sup>. 가상현실의 구축 및 항공기 조종사들의 시뮬레이터 구축등에 많이 이용되어지는 HMD는 소형이면서 다양한 영상을 구축할 수 있고 별도의 구성없이 암실효과를 얻을 수 있다는 잇점 등을 가지므로 이를 이용하여 시각자극용 시스템을 구축하였다. 영상은 소형컴퓨터와 윈도우즈 환경에서 direct-x 기술을 이용하여 2D 및 3D 패턴을 다양하게 구현하였으며, 패턴 움직임의 속도제어시 정수형 화면 좌표계로 인한 계단현상이 발생하는데, 이를 제어된 방법으로 해결하였다.

본 연구에서는 자세조절기능에 대한 이석기관의 역할을 추구하기 위하여 탈수직축 회전자극기를 개발하였으며, 공간을 차지하고 다양한 시각패턴을 만들지 못하는 기존 시각자극 시스템의 단점을 해결하기 위하여 HMD를 이용한 시각자극 시스템을 개발하였고, 노이즈에 취약한 아날로그신호인 ENG 신호의 전송문제를 해결하기 위하여 근거리 RF 무선시스템으로 개발하였다. 본 무선 HMD 시스템은 향후 자동차와 같은 이동환경의 생리신호 측정시스템으로 적용될 수 있다.

## 2. 무선 HMD 시스템 설계

### 2.1 패턴 움직임 제어 및 패턴 종류

현재의 회전자극시스템은 자세조절기능을 측정하기 위하여 전정기관의 수평 반규관만을 자극할 수 있는 기능을 가지는데 반면<sup>[4]</sup>, 본 연구에서는 이석기관까지 선별적으로 자극할 수 있는 탈 수직축 회전자극 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 피검자의 수직축을 중심으로 좌우측 방향 또는 일측 방향으로 0.01 - 0.64 Hz의 주파수에서 각 가속도를 구현하여 전정기관의 수평 반규관을 자극하거나 또는 30°의 탈수직축을 중심으로 회전하여 이석기관의 자극이 가능한 시스템이

다. 또한 시각자극을 통한 안구반응을 측정하기 위하여 현재의 시스템은 원통형 암실부스 안에 수직 막대바 그림자를 생성시키고 회전시켜 자극하는 OKN 시스템을 사용해 왔다. 본 연구에서는 공간을 차지하고 단일 패턴자극만 가능한 단점을 해결하기 위하여 HMD를 이용한 시각자극 시스템을 개발하였다. 다양한 형태의 패턴을 생성시키고 HMD에 표시하기 위하여 컴퓨터를 이용하였으며, 윈도우 2000환경에서 direct-x를 이용한 패턴생성 프로그램에 따라 다양한 형태의 패턴을 생성하였다.

시각자극 패턴은 시간간격(interval)을 갖는 움직임 외에 정현파(sine) 함수의 움직임을 갖는 자극이 있다. 이러한 자극은 최고 각속도와 주기가 정해지는 경우와 이동거리와 주기가 주어지는 경우 두가지의 정현파 함수의 자극이 있다. 이러한 자극을 정확히 주기 위해서는 회전의자의 위치별 속도가 정밀하게 제어되어야 한다. 특히 다음에 설명할 패턴의 움직임과 동기시켜 회전의자를 정밀하게 제어한다. 본 연구에서는 두가지 모두를 구현하였다. 최고 속도와 이동거리가 정해질 경우 실제 HMD에서 패턴이 움직이는 속도를 구해야 한다. HMD는 가로 및 세로가 각각 640, 480 점(pixel)으로 구성되어 있으며, 착용시 볼수있는 가시각은 각각 48도, 36도이다. 1도당 점의 수는 640/48로 약 13.333에 해당한다. 위의 함수는 다음 식으로 일반화시킬 수 있다.

$$f(t) = V_{Max} \sin(2\pi \frac{1}{T} t) \quad (1)$$

최대속도 및 움직임 주기를 알 경우에는 다음과 같다. HMD로 자극 패턴의 움직임을 만들기 위해서, 점단위로 표현하면 위 식은 다음과 같은 함수로 표현되어진다.

$$f(t) = \frac{640}{48} \frac{1}{R_f} V_{Max} \cdot \sin(2\pi f \frac{1}{R_f} t) \quad (2)$$

여기서  $R_f$ 는 화면 갱신율(reflash rate)이며,  $f$ 는 자극 패턴의 움직임 주파수를 나타낸다. 이렇게 구하면 매 화면 갱신을 마다 움직여야 하는 점의 수를 계산할 수 있으므로 이에 맞춰 패턴을 움직일 수 있다. 그러나, 점은 정수형으로 표현되므로 계산된 식의 소숫점 이하 자리를 버리고 사용하면, 자극패턴의 가속 혹은 감속이 눈으로 보이게 되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 계산되어진 점 이동수를 적분하여 실제 움직여야할 위치를 다시 계산한 후 소숫점 이하 자

리를 버리고 사용하도록 한다. 그림 1은 속도에 따라 패턴의 움직임을 위한 점의 이동량과 화면갱신 사이의 관계를 나타낸다. 긴 막대는 두 점의 움직임을 나타내며, 작은 막대는 한 점의 움직임을 나타낸다. 이로써 정수형으로만 존재하는 점의 속도 제어에서 부드러운 움직임을 만들어 낼 수 있다.

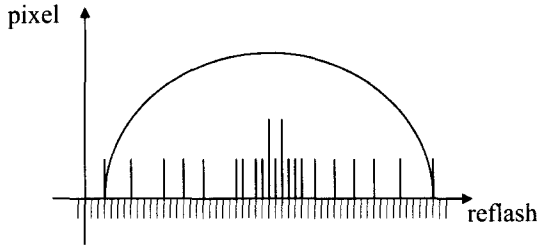


그림 1 부드러운 자극을 위한 착시 이용 개념도  
Fig. 1 Generation of soft pattern using an optical illusion

이동거리 및 주기를 알 경우의 자극패턴 함수는 일반항으로 표현된 식에서 이동거리를 이용하여 최대속도를 구하여야 한다. 이동 거리는 일반항으로 표현된 식을 적분하면 얻을 수 있으므로 적분하면 다음과 같다.

$$S = V_{Max} \int_0^{\frac{1}{2f}} \sin(2\pi ft) dt = \frac{1}{\pi f} V_{Max} \quad (3)$$

따라서 최대속도는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V_{Max} = S \cdot \pi f \text{ [rad/ sec]} \quad (4)$$

이를 이용하여 가상 자극패턴을 만들게 되며, 점 단위로 표현하면 다음과 같은 함수로 표현되어진다.

$$f(t) = \frac{640}{48} \frac{1}{R_f} \pi f \cdot \sin(2\pi f \frac{1}{R_f} t) \quad (5)$$

이러한 패턴의 움직임을 위한 일반함수를 이용하면 임의의 속도 및 주기를 갖는 자극도 가능하다. 막대의 모양을 갖는 패턴의 경우 여러 그림을 일정한 등간격을 가지고 그리며, 이를 움직이므로 생성된 그림이 이동하여 등간격을 넘어서면 가상 영역의 그림을 조금씩 이동시키며 그려야한다.

(a) 표준화 (calibration)

초기의 안구 이동각에 대한 ENG 앰프의 기준전압을 검출하도록 하고자 하는 자극이다. 좌로 15도에 점

을 발생시킨 화면을 지움과 동시에 우측 15도에 점을 발생시킨다. 이러한 것을 2초의 간격을 갖도록 만드는 패턴이다.

(b) 수직, 수평 시운동성 운동(vertical, horizontal OKN)

그림 2의 (1)과 (2)에 해당하는 것으로 흑백의 막대를 좌우 혹은 상하로 연속적으로 정현파 0.04, 0.08 Hz 두가지 주파수로 최대속도 30 [d/s]로 이동하는 것이다. 이러한 연속이동은 패턴의 움직임 제어방식으로 움직이도록 한다.

(c) 수직, 수평 시추적 운동(vertical, horizontal pursuit)

그림 2의 (3)과 (4)와 같이 작은 점을 좌우로 연속적으로 정현파 0.1, 0.2, 0.4 Hz 세가지 주파수로 이동시키는 경우이다. 이때 30도의 고정각을 가지고 패턴의 움직임 제어방식으로 움직이도록 한다.

(d) 정현파 시추적 운동(sinusoidal pursuit)

이 모드에서는 하나의 점을 정현파 0.1 Hz 주파수로 상하 좌우 동시움직임으로 연속 움직임을 만들어낸다. 그림 2의 (5), (6)에 그 영상을 표현하였다.

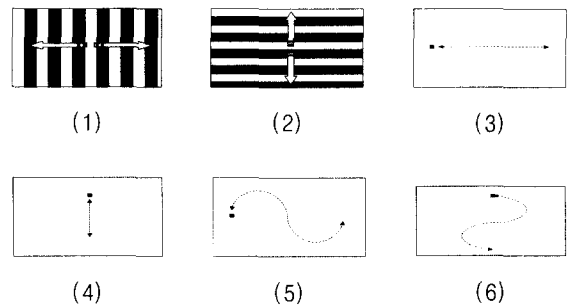


그림 2 패턴 발생기에 의한 시각자극 패턴 종류  
Fig. 2 Several patterns generated by direct-x program

2.2 무선 송수신을 위한 패킷 생성 및 protocol 개발

측정된 안구신호를 안정적으로 취득하기 위해서는 기존 유선 전송방식의 문제점인 슬립링 (slip ring)을 통한 접촉 노이즈 및 모터 구동시 발생하는 노이즈의 영향을 최소화하기 위하여 근거리 RF모뎀을 사용한 무선 전송방식을 사용하였다. 무선을 사용하기 위해서는 일정한 패킷을 만들어야 하고, 대부분의 경우 무선 모듈 사이는 커패시터와 같이 모델링이 되기 때문에 직류모양을 가지는 데이터의 전송이 어렵다. 따라서 내부적으로 코딩기를 가지고 있는 CM-RS232(청우산

업) 모델을 사용하고 표 1과 같이 기본적인 패킷으로 구성하였다. 1개의 패킷은 404 byte로 구성된다. 따라서 1 byte당 10 비트(bit) 전송방식을 사용하면 전체 비트수는 4,040 비트이며 1초에 2회의 패킷을 송신하며, 송수신 전환 주기가 같아야 함으로 4배의 전송속도가 필요하므로 16,160 [bit/sec]가 된다. 따라서 무선 모델은 최소 19200 bps의 속도를 만족해야 한다.

표 1 패킷 구성도

Table 1 Structure of the wireless data packet

Start Char (0x01)	Data (400 Byte)	Ack	Stop Char (0x03)
----------------------	-----------------	-----	---------------------

### 3. 전체 시스템 구성

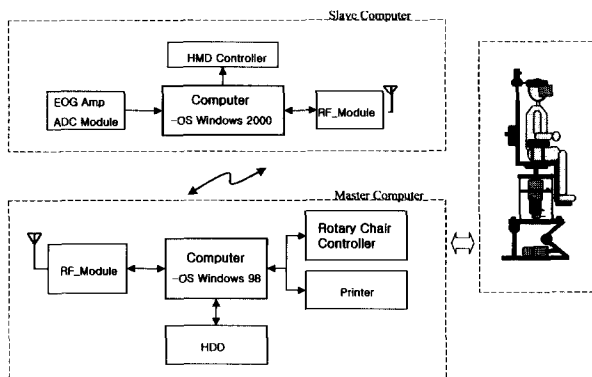


그림 3 탈수직축 회전자극 시스템의 전체구성도  
Fig. 3 Configuration of the off-vertical rotatory chair system

전체 시스템은 그림 3과 같이 구성되어 있다. 기존의 시스템은 주 컴퓨터에 의해서 ENG 신호를 샘플링하며, 회전 자극기의 회전모터 및 OKN 드럼 등을 제어하도록 되어 있다. 이러한 시스템에서 ENG 신호를 샘플링하기 위해서는 슬립링을 통하여 주 컴퓨터까지 신호를 보내도록 함으로서 신호 전달시 잡음의 유입 경로가 많아지며, 부스의 벽에 그림자를 형성하여 자극하기 때문에 시각 자극의 패턴이 다양하지 못하다는 단점을 지닌다. 그러나 개선된 시스템은 HMD와 보조 컴퓨터가 시각 자극을 위한 패턴발생과 ENG신호를 디지털로 변환하고, ENG 앰프의 제어를 담당한다. 따라서 기존 시스템과 달리 신호선의 경로가 짧으며, 슬립링과 같은 불안정한 접점 등이 없으므로 잡음의 유

입경로를 줄일 수 있다.

주 컴퓨터는 자극패턴의 발생 명령, 회전 자극기의 회전 모터의 속도 지령, ENG신호의 분석 그리고 환자의 데이터 베이스 생성 및 관리 등을 담당한다. 이 시스템은 크게 주 컴퓨터와 소형 이동형인 보조 컴퓨터로 나뉜다. 주 컴퓨터에서는 보조 컴퓨터에 보내오는 데이터를 모으고 분석하며 회전의자의 동작을 관리한다. 또 전반적인 제어를 담당한다. 회전의자 제어기는 회전의자의 2D 또는 3D를 결정하고 여러 종류의 속도를 제어한다. 보조 컴퓨터는 주 컴퓨터의 지령에 의해 HMD에 표시할 시작자극 패턴을 결정하고 제어한다. 또한 ENG신호를 A/D변환하고 임시 저장한 후 주 컴퓨터로 hand shaking 무선통신방법으로 전송한다.

#### 3.1 제어 알고리즘

회전자극 및 시각자극을 가하고 안구운동을 기록하기 위한 탈수직축 회전자극시스템은 수직축을 중심으로 하는 평형상태의 회전운동과는 달리 무게중심이 수시로 변경되어 불평형 상태의 회전부하를 유발하여 회전체의 제어오차를 유발함으로써 무게중심의 많은 변화를 동반하기 때문에 정확한 회전속도의 제어를 위해선 고 토크 정밀 저속제어가 필요하다. 기울임과 피검자의 체중에 의한 불평형 부하를 데드비트형 외란 관측기로 추정하여 보정하는 방법을 적용하였다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{P}{2J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_t \frac{P}{2J} \\ 0 \end{bmatrix} i_{qc} + L \left( w - [1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

이를 위하여 DC machine과 AC machine의 장점을 갖는 PMSM을 사용하였으며, 측정값의 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 moving average filter 사용방법을 개발하였다.

$$H(z) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} z^{-k} \quad (7)$$

식 (7)은 MA의 전달 함수이며 N은 데이터의 갯수를 나타내고 z는 단위 지연을 나타낸다. 여기서 N에 2를 대입하고 관측기에 의해서 추정된 외란을 입력으로 하면 신호의 왜곡이 적으며 고주파 잡음을 저감한 의

란을 식 (8)에 의해서 얻을 수 있다.

$$\hat{T}_L(k) = \frac{1}{2} (\hat{T}_L(k) + \hat{T}_L(k-1)) \quad (8)$$

$\hat{T}_L$ 은 잡음을 저감시킨 외란이며  $\hat{T}_L$ 은 데드비트 관측기에 의해 추정된 잡음을 포함한 외란이다. 제안된 속도 제어기의 구성도는 그림 4와 같다. 관측된 외란에 포함된 노이즈는 MA필터로 그 양을 줄인다.

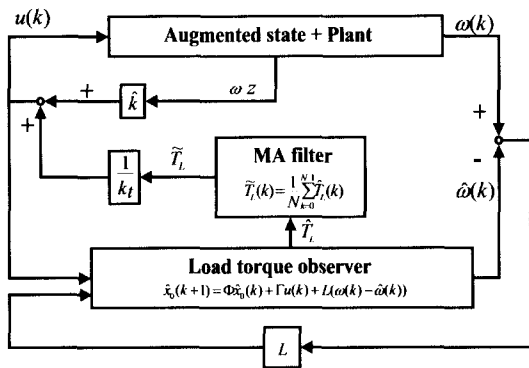


그림 4 제안된 속도 제어기의 구성도  
Fig. 4 Configuration of the proposed speed controller

3.2 제어기 구성

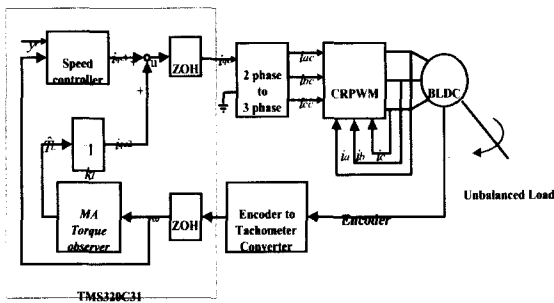


그림 5 제안된 정밀 속도 제어 시스템의 블록선도  
Fig. 5 Block diagram of the proposed precision speed control system

제어기는 그림 5와 같이 속도제어기와 외란 관측기의 두 부분으로 구성되며, 속도 제어기는 추가 상태 궤환 (augmented state feedback)으로 이루어진다. 추가 상태 z(k+1)의 실현을 위해 이산치 형태는 평행사변형 방식을 이용하였다. 디지털 제어기는 부동소수점

연산이 가능한 DSP TMS320C31를 사용하고, 전동기 시스템은 선형 시스템을 만들기 위해서 벡터 제어기로 구동한다. 엔코더 기반의 속도 궤환의 잡음 및 양자화 오차를 줄이기 위해서 MT방법을 사용하여 속도를 측정하였다. 외란 관측기에서 추정된 외란의 잡음 영향을 줄이기 위해 MA필터를 사용하고, 잡음영향을 줄인 추정된 외란은 속도 오차 보상에 사용된다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험방법

24~30세의 건강한 대학생 남녀 50명을 대상으로 HMD 시스템을 사용하여 시운동자극, 시추적운동, 시단속운동을 실시하였으며 탈수직축 회전 자극기를 이용하여 회전자극에 대한 안구반응을 측정하였다, 안구 신호 검출용 전극은 Ag-AgCl 표면전극을 사용하였으며, 우측 안구의 안외각체피 (lateral epicanthus)에 탐색전극을, 좌측의 안외각체피에 무관전극을, 이마의 정중앙 부위에 접지전극을 부착하였다.

안구운동을 기록하기 위하여 피검자에게 전극을 부착한 후 피검자의 머리를 앞쪽으로 30도 가량 숙여 수평반규관이 수평면과 수평상태를 유지하므로써 더욱 강한 자극을 얻을 수 있도록 하였다. 또 약 10분 동안 암실상태에서 적응시킨 후 전정안구반사의 억제를 방지하기 위하여 검사시간 동안 간단한 숫자계산이나 질문에 대한 답변 등으로 맑은 의식상태를 유지하도록 하였다. 안구운동 과형은 안구가 탐색전극 방향으로 회전하면 상방을 향하고 무관전극 방향으로 회전하면 하방을 향하도록 한다.

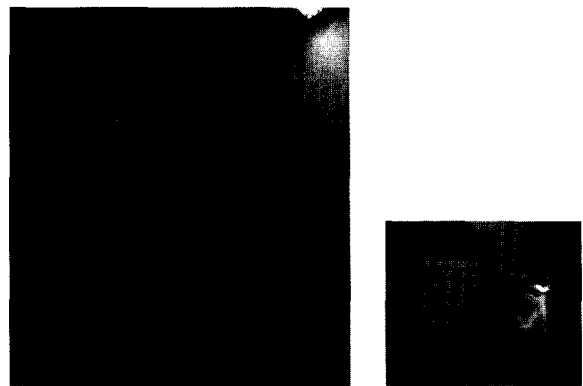


그림 6 탈수직축 회전자극 시스템  
Fig. 6 Total off-vertical rotatory system

### 4.2 안구운동 분석

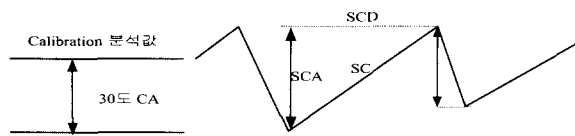
안구운동은 톱니파 형태의 안진(nystagmus)으로 기울기가 느린 서상(slow component)과 빠른 속상(fast component)으로 구성되며, 실제 안구의 움직임은 안진의 서상으로, 서상의 기울기를 안구속도(eye velocity)로 계산하게 된다. 안구속도는 안진 서상을 단위 1초에 대한 기울기의 각도로써, 식 (9)과 그림(7)처럼 구한다. 이때 이득(gain)은 식 (10)와 같이 안구운동 최대속도와 자극 최대속도 비로 구하며, 위상(phase)은 식 (11)과 같이 둘간의 위상차로써 구한다. 대칭성(symmetry)은 식 (12)처럼 좌/우 이득간의 차를 백분율로 구한다<sup>[5][6]</sup>.

$$eye\ velocity = \frac{30 \times SCA}{CA \times SCD} \quad (9)$$

$$gain = \frac{peak\ eye\ velocity}{peak\ stimulation\ velocity} \quad (10)$$

$$phase = \frac{peak\ stimulation\ velocity - peak\ eye\ velocity}{peak\ eye\ velocity} \quad (11)$$

$$symmetry = \frac{(Rgain - Lgain)}{(Rgain + Lgain)} \times 100 \quad (12)$$



- CA : calibration amplitude
- SCA : slow component amplitude
- SCD : slow component duration

그림 7 안진의 서상에 대한 안구속도 계산  
Fig. 7 Calculation of eye velocity

### 4.3 안구운동 실험결과

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 ENG의 신호 이득을 변화시킬 수 있으므로 안구의 운동량을 직접 측정할 수 없다. 이러한 이유로 각 피검자에서 안구운동량의 표준이 되는 기준치가 필요하게 되고 이를 위하여 표준화 검사과정을 거치게 된다.

표준화의 방법으로는 피검자의 안구가 정면에서 정해진 각을 이동하는 점을 주시하므로써 정해진 점의 이동각에 대한 안구운동과형의 높이가 결정된다. 이러

한 신호분석의 표준치로 이득을 산출하는데 기준이 된다.

본 시스템에서는 HMD를 사용하여 점을 생성하고 direct-x를 이용한 패턴제어 프로그램에 의하여 점을 주기적으로 2초 간격으로 좌우측의 30도 범위를 이동시켜 안구신호에 대한 ENG의 전기신호를 각도에 비례한 이득값으로 변환하여 표준화하였다. 그림 8은 표준화 장치를 이용한 안구운동을 표시한 것으로 안구가 좌측과 우측으로 각각 15도씩 이동하였을 때 기록된 안진곡선의 파형이다. 안구가 우측을 향하면 파형은 상방을, 좌측을 향하면 하방을 향하였다. 그림 8에서 나타나듯이 하단의 좌우 신호에 따라 안구신호인 상단의 파형이 변동함을 알 수 있다. 이때 측정된 안구신호의 상방 평균값에서 하방 평균값을 뺀 차가 30도 시각자극에 따른 안구의 기준전위(V)가 된다.

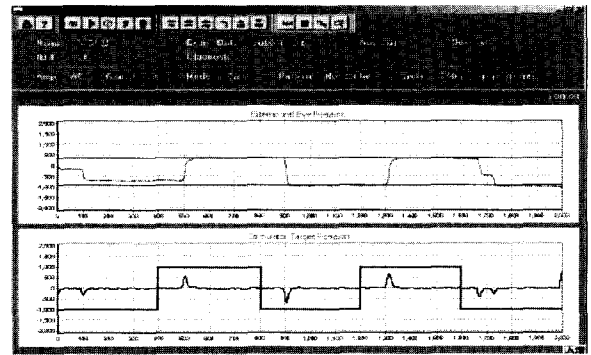


그림 8 점을 좌우측으로 15° 이동하여 얻어진 안구운동의 표준화검사 신호 (R, 우측; L, 좌측)  
Fig. 8 Calibration of the eye movement induced by moving point at degree of 15 (R, right; L, left)

안구운동의 조절에 관여하는 시각의 역할을 추구하기 위하여 피검자가 고정된 상태에서 시운동성 자극을 가하였다. 시운동성 자극은 HMD를 사용하여 10도 간격으로 그려진 흑백의 수평 혹은 수직 막대바를 만든 후 부드러운 패턴 발생프로그램에 의하여 30 deg/s의 속도로 0.04, 0.08 Hz 정현파 회전자극을 가하면서 출현한 안구운동을 측정하였다. 전정기관의 자극을 배제하고 시운동성 자극만을 가하기 위하여 피검자가 고정된 상태에서 막대그림자를 좌측과 우측 방향으로 회전하였다. 이때 안진이 출현하였으며 좌측 방향의 회전에 의하여 안진의 속상은 우측을, 우측 회전에 의하여 속상은 좌측을 향하였는데 이는 선행 연구결과와도 일치하였다. 아래 그림에서 위의 파형이 안진신호이며,

이의 서상의 기울기를 속도로 계산하여 아래과형으로 나타냈다.

이 그림은 정상인의 신호를 잘 나타내고 있다

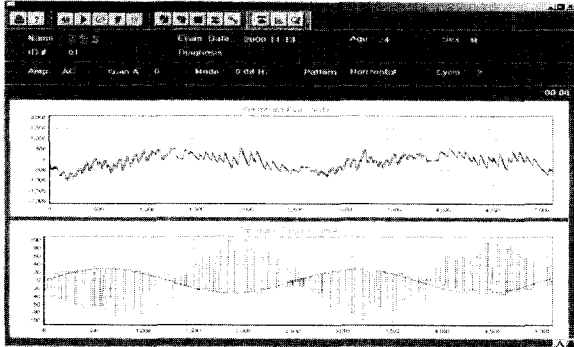


그림 9 정상 성인에서 30 d/s의 시운동성 자극에 의한 안구반응

Fig. 9 Eye movement induced by optokinetic stimulation with 30d/s in a healthy adult

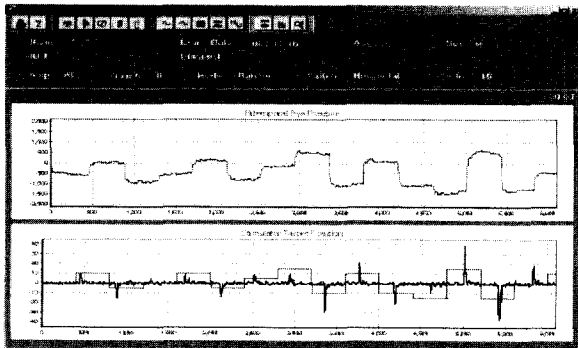


그림 10 정상 성인에서 15도 간격 시단속 자극에 의한 안구반응

Fig. 10 Eye movement induced by saccade stimulation with 15° in a healthy adult

단속운동을 측정하기 위하여 좌우 30도 범위에 점을 2초의 간격으로 이동하고 점을 주시하였을 때 나타나는 안구반응을 기록하여 잠복기(latency), 정확도(accuracy), 속도(velocity)를 측정하였다.

$$\text{latency} = \text{action time of target movement} - \text{response time of eye movement} \quad (13)$$

$$\text{accuracy} = \text{action degree of target movement} - \text{response degree of eye movement} \quad (14)$$

시추적 운동은 좌우측 30도 범위의 점을 이용하여, 0.1 Hz, 0.2 Hz, 0.4 Hz 정현파 회전자극때 안구운동을

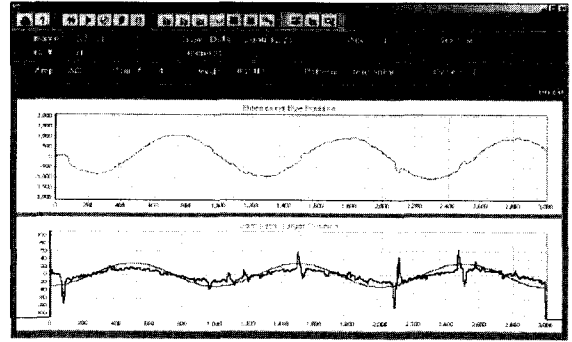


그림 11 정상 성인에서 30 d/s의 시추적 자극에 의한 안구반응

Fig. 11 Eye movement induced by pursuit stimulation with 30d/s in a healthy adult

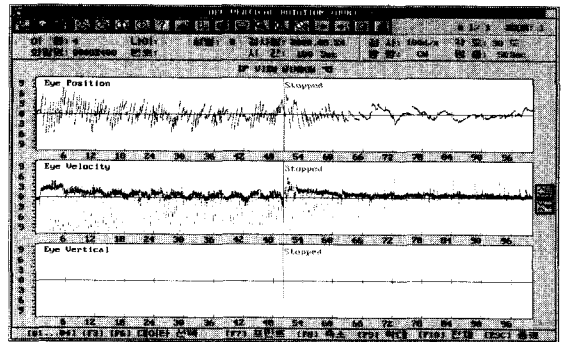


그림 12 탈수직축 회전자극에 따른 안구운동

Fig. 12 Eye movement induced by off-vertical axis rotation for 50 sec

측정하여 이득, 위상을 구하였다. 그림 11에서 하단 정현파 자극에 따른 상단 안구운동이 유발함을 볼 수 있다. 이때 실제 계산된 안구속도가 하단에서 정현파 자극에 유사함을 보인다.

이석기관의 기능을 평가할 목적으로 피검자의 수직축을 30도 기울여 탈수직축의 상태에서 일측 방향으로 50초 동안 등속회전하면 지속적인 안구운동이 출현하였다. 회전자극의 초기에는 회전자극과 반대방향의 서상을 갖는 빠른 안진이었으나 점차 감소하였고, 회전 위치와 일치하여 정현파의 안구운동에서 지속적으로 안진이 동반되었다(그림 12). 이때 초기에 유발되는 안진의 속도를 크기(amplitude)로 구하며, 초기값이 37%로 감소된 시간을 시상수(time constant)로 구하였다. 회전자극 동안의 주기적인 성분을 변조(modulation)로 구하며, 더 이상 감소되지 않는 안구속도를 경향(bias)으로 구하였다<sup>17)</sup>.

### 5. 결 론

본 연구에서는 전정기관의 반규관과 이석기관을 선택적이고 정량적으로 자극할 수 있는 탈수직축 시스템을 개발하였으며, 다양한 시운동 자극 패턴으로 자극하기 위하여 HMD를 사용한 시각자극 시스템을 개발하였다. 이때 정확한 자극을 위해 회전의자의 불평형 부하를 감소시키는 robust 제어 시스템을 적용하였다.

이 robust 속도 제어를 위하여 부하 관측기를 사용하고 속도센서의 노이즈 영향을 줄이고자 MA filter를 응용하였다. 또한 데이터 전송시 손실 및 노이즈 경감을 위하여 RF 모뎀을 사용한 무선전송시스템을 개발하였다. 이 제안된 시스템으로 안구운동의 속도를 계산하여 이득, 위상, 대칭성을 산출할 수 있었다. HMD 시스템은 다양한 시각자극 시뮬레이터로 활용되어 질 수 있을 것을 생각되며, 무선 데이터 전송시스템은 자동차와 같은 이동환경에서 생리 신호를 측정할 수 있는데 적용되어 질 수 있을 것으로 사료된다. 또한 전력전자의 불평형 회전의자 제어용 모터구동 기술과 의학기술의 접목으로써, 그 의의가 크다고 생각된다.

이 논문은 2001년도 원광대학교의 교비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] A. Herman, Jenkins and Jefim Goldberg, "Test-Retest Reliability of the Rotatory Test in Normal Subjects", *Adv Oto-Rhino-Laryng*, Vol. 41, pp. 190~195, 1988.
- [2] Jong Sun Ko, "Asymptotically Stable Adaptive Load Torque Observer for Precision Position Control of BLDC Motor", *IEE Proc. Electric Power Application*, vol. 145, No. 4, pp. 383~386, July 1998.
- [3] 고종선, 이태호, 박병림, 전철환, "전정기관 자극용 회전 자극기를 위한 PMSM의 정밀 속도제어", *KIPE*, Vol. 5, No. 5, pp. 459~466, Oct. 2000.
- [4] Lim SK, Jeon HC, Kim GK, Jin DB, Kim MS, Lee MY, Park BR, "Development of the sinusoidal rotatory chair system for evaluation of the vestibular function.", *Korean J Sci Emot Sensibil*, No. 1, pp. 18 1~197, 1998.
- [5] 김규겸, 정호준, 박병림, "평형감각 측정을 위한 안구운동 분석 프로그램의 구현", *한국감성과학회*, 1998.
- [6] Wall C, Black FO, "Algorithms for the clinical

analysis of nystagmus eye movements", *IEEE Trans Biomed Eng*. No. 28, pp. 638~646, 1981.

- [7] Conrad WALL, III, Joseph M.R, Furman, "Nystagmus responses in a group of normal humans during earth-horizontal axis rotation", *Acta Otolaryngol (Stockh)*, No. 108, pp. 327~335, 1989.

### 저 자 소 개



#### 김규겸(金圭謙)

1972년 1월 19일생. 1996년 원광대 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년 3월~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정. 컴퓨터 및 제어 시스템 전공.



#### 고종선(高宗宣)

1960년 3월 20일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1983년~1995년 삼성전자 생산기술센터 선임 연구원. 1995년~1996년 삼성그룹 삼성경영기술대 사내 교수(부장). 1999년~2000년 1월 미국 Tennessee 주립대(UT), 방문교수. 1996년~현재 원광대학교 전기전자공학부 조교수.



#### 박병림(朴炳林)

1953년 8월 15일생. 1978년 전남대 의과대학 졸업. 1983년 전남대 대학원 생리학 전공(의학박사). 1982년 3월~1988년 2월 전남대 의과대학 전임강사, 조교수. 1984년 9월~1986년 8월 미국 Baylor의과대학 Rockefeller대학 전정신경생리학 전공. 현재 원광대 의과대학 생리학교실 교수.



#### 김인동(金仁東)

1960년 8월 27일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학). 1991년~1996년 대우중공업 철도차량연구소 책임연구원. 1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee 방문교수. 1996년~현재 부경대학교 전기 제어계측공학부 조교수.