

탈수직축 회전자극을 이용한 자세조절기능의 평가

김규점^{1,2}, 이태호², 김주환², 고종선², 박병림¹

¹원광대학교 의과대학 생리학교실, ²원광대학교 대학원 전자공학과

Evaluation of Postural Control by Off-vertical Axis Rotation

KG Kim^{1,2}, Tae Ho Lee², Joo Whan Kim², Jong Seon Koh², Byung Rim Park¹

¹Department of Physiology, Wonkwang University School of Medicine

²Faculty of Electronic Engineering, Wonkwang University Graduate School

Abstract

Off-vertical axis rotator was developed to differentiate each function of the canal and otolith in the vestibular system and evaluate subjective symptoms during postural change. Eye movement induced by various types of rotation was measured in normal subjects.

Nystagmus with fast component corresponding to direction of rotation was occurred by sinusoidal earth vertical axis rotation, and the gain of eye movement in vestibuloocular reflex (VOR) was lower than in visual vestibuloocular reflex (VVOR) and higher than in visual fixed vestibuloocular reflex (VFX). Degree of dizziness was proportioned to degree of gain. Off-vertical axis rotation was produced severe dizziness than earth vertical axis rotation. These results suggest stimulation of the otolith should be minimized to make a stable and pleasant condition in work and travel.

서론

반사적인 자세의 조절은 전정기관, 시각, 고유수용체 등에 의하여 이루지며, 특히 전정기관은 안구운동을 조절하는 전정안구반사와 골격근의 수축을 조절하는 전정척수반사를 초래하기 때문에 중요한 역할을 갖는다. 내이에 위치한 전정기관은 각가속운동에 관여하는 반규관과 선가속운동에 관여하는 이석기관으로 구성되어 있기 때문에 자세조절에 대한 반규관의 기능을 평가하기 위해서는 개체의 수직축을 중심으로 회전자극하여 주로 수평반규관을 자극하는 방법 (yaw rotation)을 많이 사용하며, 이석기관의 기능을 평가하기 위해서는 선운동을 이용하거나 탈수직축 회전자극 (off-vertical axis rotation)을 이용한다.

이석기관을 자극하기 위해서는 중력의 방향에 대하여 기울어진 탈수직축을 중심으로 회전자극을 가하여야 하며, 이러한 탈수직축 회전자극은 반규관-안구반사, 이석기관-안구반사, 반규관-이석기관 상호관계를 포함한 전정안구반사를 평가할 수 있는 전정기관 자극방법이다 (Darlot & Denise, 1988; Raphan

et al, 1981; Furman et al, 1992). 그러나 탈수직축 회전은 이석기관 뿐만 아니라 반규관을 동시에 자극하기 때문에 순수한 이석기관만을 자극하기 위해서는 일정한 속도의 탈수직축 회전자극으로 중력에 대한 개체의 위치를 지속적으로 변화시킴에 의하여 이루어진다 (Guedry, 1965; Raphan et al, 1981).

이 연구는 자세조절기능에 대한 이석기관의 역할을 추구하고 위하여 탈수직축 회전자극기를 개발하였으며, 전정기능이 정상인 성인에서 수직축과 탈수직축 회전자극을 가하였을 때 출현하는 안구운동을 분석하여 회전자극 동안의 주관적 증상인 어지러움과의 연관성을 비교하였다.

방법

탈수직축 회전자극기 개발: 탈수직축 회전자극시스템은 수직축을 중심으로 하는 평형상태의 회전운동과는 달리 무게중심이 수시로 변경되어 불평형상태의 회전부하를 유발하여 회전체의 제어 오차를 유발함으로써 무게중심의 많은 변화를 동반하기 때문에 정확한 회전속도의 제어를 위해선 고 토크 정밀

저속제어가 필요하다. 이를 위하여 DC machine과 AC machine의 장점을 갖는 PMSM (permanent magnet synchronous machine)을 사용하였으며, 측정값의 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 Moving average filter 사용방법을 개발하였다 (Fig. 1).

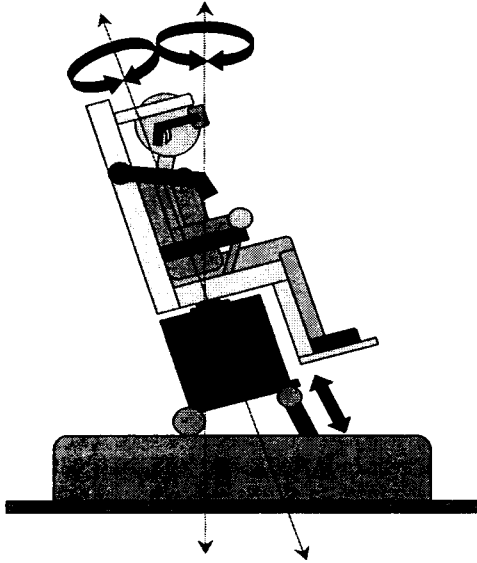


Fig. 1. Schematic diagram of off-vertical axis rotator

피검자: 전정기능이 정상이고 과거 병력상 신경학적 이상이 없는 20 - 30세의 건강한 성인 5명을 대상으로 하였다.

회전자극: 피검자를 회전자극시스템에 앉힌 후 머리를 전방으로 30도 숙여 수평반규관이 수평면에 일치하도록 고정하였다. 수평반규관을 선택적으로 자극하기 위하여 수직축을 중심으로 고정한 후 50, 60, 100, 120 deg/sec의 일정한 속도로 90초간 일측 방향으로 회전하였다 (earth vertical axis rotation: EVAR). 이 자극은 사다리꼴 속도 (trapezoid velocity)로 자극 시작 1초 동안 50, 60, 100, 120 deg/sec²로 가속하여 일정한 속도를 유지한 후 자극 정지 1초 동안 시작과 동일한 가속도로 감속하였다. 이석기관을 선택적으로 자극하기 위해서는 회전자극 시스템을 수직축으로부터 30도 기울인 상태에서 (off-vertical axis rotation: OVAR) 피검자를 고정하여 수직축 회전자극과 동일한 방법으로 자극하였다.

안구운동의 기록 및 분석: 양측 안외각체피 (lateral epicanthus) 부위에 Ag-AgCl 표면전극을 부착하였으며, 이때 탐색전극은 우측에 무관전극은 좌측에, 그리고 접지전극은 이마의 중앙에 부착하였다. 안진 곡선에서 상방을 향하면 우측방향이 회전을, 하방을 향하면 좌측방향이 회전을 나타낸다. 안진곡선에서 서상의 속도를 대상으로 시상수, 경사도, 안진의 출현시간 등을 분석하였다.

실험성적

1. 수직축의 정현파 회전자극에 의한 안구운동

피검자의 수직축을 중심으로 좌측과 우측으로 정현파 회전자극을 가하면 서상이 회전자극과 반대방향을 향하는 안진이 출현하였다 (Vestibuloocular reflex: VOR). 즉, 우측 방향의 회전자극에 의해서는 안진의 서상이 좌측을, 좌측 방향의 회전자극에 의해서는 서상이 우측을 향하였다. 0.01 Hz ~ 0.64 Hz의 범위에서 회전자극을 가하였을 때 출현한 안구반응을 분석하여 이득 (gain), 위상 (phase), 대칭성 (symmetry)을 산출하였다. 회전자극의 속도에 대하여 안구반응의 속도를 표현하는 이득은 0.01 Hz에서 0.41 ± 0.21 (mean \pm 2SD)로부터 0.64 Hz에서는 0.65 ± 0.35 로 점차 증가하였다. 그리고 회전자극의 최대 속도점과 안구운동의 최대속도점의 차이를 나타내는 위상은 0.01 Hz에서 $-38 \pm 25^\circ$ (mean \pm 2SD)로부터 0.64 Hz에서는 $1 \pm 31^\circ$ 로 느린 회전자극에서는 위상의 선형을 보였으나 빠른 회전자극에서는 위상의 지연을 보였다. 그리고 양측 전정기관의 기능을 나타내는 대칭성은 모든 주파수에서 $0 \pm 26\%$ (mean \pm SD)이었다. 그러나 시각에 의하여 전정기능을 억제할 경우 (Visual suppression: VFX)는 모든 회전주파수에서 이득이 0.2 이하로 감소하였으며, 위상과 대칭성은 회전자극에 의한 반응과 차이가 없었다. 또한 시각에 의하여 전정기능을 항진시켰을 경우 (Visual enhancement: VVOR)이득은 모두 0.8 이상으로 증가하였으며, 위상과 대칭성은 변화하지 않았다. 이러한 회전자극 동안 피검자의 주관적 감성을 조사한 결과 모든 피검자에서 VVOR의 경우 어지러움을 호소하였으며, VOR에서는 약간의 어지러움을, 그리고 VFX에서는 어지러움을 전혀 느끼지 않았다고 하였다 (Fig. 2).

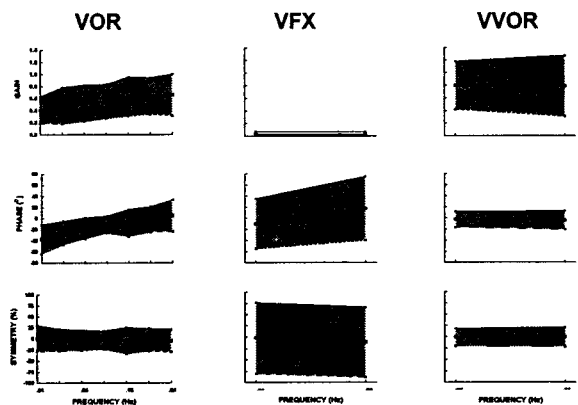


Fig. 2. Gain, phase and symmetry of eye movement induced by earth vertical axis rotation at 0.08 Hz

2. 수직축의 등속회전자극에 의한 안구운동

피검자의 수직축을 중심으로 일정한 속도의 회전자극을 90초 동안 가하였을 때 회전자극과 반대방향을 서상을 갖는 안진이 출현하였으며, 회전자극의 초기에는 빠른 안진에서 시간이 경과함에 따라 점차 감소하여 25 - 35초 이내에 소실되었다. 그리고 회전자극에 의한 안구운동의 속도가 최대값의 37%로 감

소하는 시간인 안진의 시상수는 13 ± 3 초이었다. 일정한 속도의 회전자극을 90초 후 멈추었을 때 회전자극 동안 소실되었던 안진이 다시 출현하였으며, 안진의 방향은 회전자극 때와는 반대이었다.

3. 탈수직축 회전자극에 의한 안구운동

전정기관에서 선가속운동과 중력에 반응하는 이석기관의 기능을 평가할 목적으로 피검자의 수직축을 30° 기울여 탈수직축의 상태에서 일측 방향으로 90초 동안 등속회전하면 지속적인 안구운동이 출현하였다. 회전자극의 초기에는 회전자극과 반대방향의 서상을 갖는 빠른 안진이었으나 점차 감소하였고, 회전위치와 일치하여 정현파의 안구운동에서 지속적으로 안진이 동반되었다 (Fig. 3).

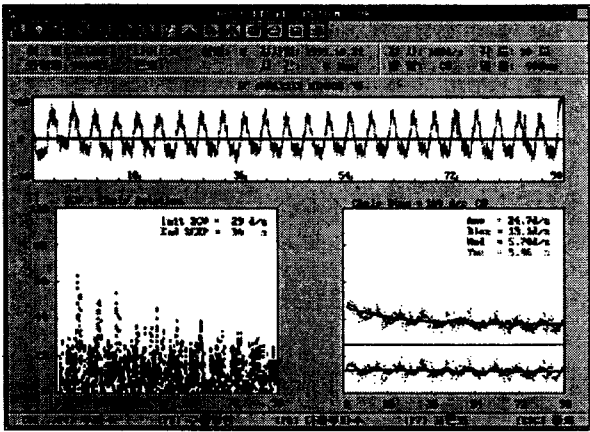


Fig. 3. Eye movement induced by off-vertical axis rotation for 90 sec

고찰

일상생활에서 반사적인 자세의 조절은 전정기관, 시각, 고유수용체 등의 구심성 신호가 전정신경핵에 전달되어 소뇌와의 통합작용에 의하여 안구운동과 골격근의 수축을 조절한다 (Wilson & Melville Jones, 1979). 특히 내이에 위치한 전정기관은 전정안구반사와 전정척수반사를 초래하며, 전정안구반사는 측정이 용이하고 정확하기 때문에 자세조절기능을 평가할 목적으로 널리 이용되고 있다 (Barber & Stockwell,). 전정기관은 각가속운동에 관여하는 반규관과 선가속운동에 관여하는 이석기관으로 구성되어 있으며, 피검자의 수직축을 중심으로 회전자극에 의하여 출현하는 안구운동은 반규관안구반사 (Canal-ocular reflex)로 전정기관에서 반규관의 기능을 평가하는 방법이다. 그러나 탈수직축 회전자극기를 이용하여 지속적인 등속회전을 가할 경우는 중력에 의하여 전정기관의 이석기관을 자극할 수 있으며, 이때 출현한 안구운동은 이석기관안구반사 (Otolithic-ocular reflex)라 할 수 있다 (Darlot et al, 1988).

반규관안구반사에서 회전자극의 속도가 증가함에 따라 안구운동의 속도가 증가함은 질량의 법칙인 $F=ma$ 에서 반규관에 주어진 힘 (F)은 반규관의 질량 (m)이 일정하기 때문에 주어진 가속도 (a)의 크기에 비례함으로 설명할 수 있다. 위상은 느린 회전자극에서 선행을 보이고 빠른 회전자극에서 지연을 보임을 이들 반사가 전정신경핵과 소뇌를 통한 복잡한 신경로에서 설명할 수 있으며, 대칭성은 양측 반규관의 기능이 정상이라면 낮은 수치를 보임이 타당하다. 그러나 VFX와 VVOR의 경우 VOR과 비교할 때 위상과 대칭성은 차이가 없으나 이득에서 많은 차이가 보임은 감성과학적 측면에서 자세조절기능을 평가할 경우 이득이 보다 중요함을 시사한다. 전정반사의 시각에 의한 억제인 VFX는 시각을 통한 구심성 신호가 소뇌를 경유하여 전정신경핵을 억제함으로 (Ito et al, 1975) 매우 낮은 이득을 보이며, 이 경우는 모든 피검자들이 회전자극에 의한 어지러움을 호소하지 않았다. 그러나 시각에 의한 전정안구반사의 항진 경우에는 높은 이득을 보였으며 모든 피검자에서 어지러움을 호소하였다. 이러한 결과는 회전자극에 의한 전정안구반사에서 이득이 주관적인 감성지표와 관련성이 있음을 시사한다.

피검자의 수직축을 중심으로 일정한 방향으로 90초 동안 등속회전하여 나타난 안구반응을 중심으로 측정된 시간상수는 회전자극에 대한 반규관의 기능을 평가할 수 있는 방법 중의 하나이며, 10초 이하인 경우는 비정상적으로 간주한다. 회전자극의 시작에 의하여 빠르게 나타난 안진은 30-60초 전후에 소실되며, 회전자극을 멈추면 회전자극시와는 반대방향의 안진이 다시 출현한다. 수직축을 중심으로 회전자극하면 회전방향과 동측의 수평반규관은 내임파액의 ampullopetal flow에 의하여 흥분하지만 등속자극은 내임파액의 흐름을 정지시켜 섬모는 탄력성에 의하여 원위치를 회복함에 따라 안진은 사라진다. 그 후 회전을 멈추면 관성에 의하여 동측 수평반규관의 내임파액은 ampullofugal flow를 초래하여 억제되어 회전자극시와는 반대방향의 안진이 출현하며 이를 회전후안진이라 한다.

탈수직축을 중심으로 회전자극하였을 때 출현한 안구반응은 이석기관의 기능을 평가할 수 있는 방법으로 등속도를 유지하기 위한 초기 가속도 상태에서는 순간적으로 반규관이 자극받지만 등속회전이 주어지면 중력이 작용하게 되어 이석기관이 자극을 받는다. 탈수직축회전에서 자극의 속도가 증가함에 따라 이득과 진폭이 증가하였으며, 수직축의 회전자극보다 피검자들이 느끼는 어지러움은 증가하였다. 따라서 반규관의 자극보다는 이석기관의 자극이 보다 강한 어지러움을 유발하기 때문에 안정된 작업환경이나 쾌적한 여행환경을 구축하기 위해서는 이석기관의 자극을 최소화할 수 있는 방안이 제시되어야 한다.

결론

자세조절에 관여하는 전정기관의 반규관과 이석기

관의 기능을 선별적으로 평가하고 자세변동에 따른 주관적인 감성과의 관련성을 추구하기 위하여 탈수직축 회전자극기를 개발하였으며, 정상 피검자에서 다양한 회전자극을 가하였을 때 출현한 안구운동을 측정하였다.

수직축을 중심으로 정현파회전자극을 가하였을 때 속상이 회전자극과 동일한 방향을 향하는 안진이 출현하였으며, 안구반응의 이득은 시각에 의한 항진(VVOR)에서 가장 높고, 시각에 의한 억제(VFX)에서 가장 낮았다. 회전자극에 의한 어지러움은 VVOR에서 가장 강하고 VFX에서는 동반되지 않았다. 그러나 탈수직축 회전자극은 수직축 회전자극에서보다 강한 어지러움을 동반하였다. 이러한 결과는 회전자극에 의한 어지러움이 안구반응의 이득과 비례하며, 안정된 작업환경과 쾌적한 여행환경을 구축하기 위해서는 이석기관의 자극을 최소화할 수 있는 방안이 제시되어야 한다. (이 연구는 1999년도 과학기술부 감성공학 연구비 지원에 의하여 이루어졌음)

References

- Barber HO, Stockwell CW: Manual of electronystagmography. CV Mosby Co, 1980
- Darlot C, Denise P, Droulez J, Cohen B, Berthoz A: Eye movements induced by off-verticla axis rotation at small angles of tilt. Exp Brain Res 73: 91-105, 1988
- Darlot C, Denise P: Nystagmus induced by off-verticla rotation axis in the cat. Exp Brain Res 73: 78-90, 1988
- Furman JM, Schor RH, Schumann TL: Off-verticla axis rotation: a test of the otolith-ocular reflex. Ann Otol Rhinol Laryngol 101: 643-650, 1992
- Guedry FE: Orientation of the rotation-axis relative to gravity: its influence on nystagmus and the sensation of the rotation. Acta Otolaryngol Stockh 60: 30-49, 1965
- Ito M: The vestibulo-cerebellar relationships: vestibulo-ocular reflex arc and flocculus. In: The vestibular system, edited by RF Naunton, Academic Press, 1975, pp129-145
- Raphan T, Cohen B, Henn V: Effects of gravity on rotatory nystagmus in monkeys. Ann NY Acad Sci 374: 44-55, 1981
- Wilson VJ, Melvill Jones G: Mammalian vestibular physiology. Plenum Press, 1979