

Vestibulospinal Reflex and Locomotion

Gyu Cheol Han

Department of Otolaryngology-Head & Neck Surgery, Gachon University of Medicine & Science, Graduate School of Medicine, Incheon, Korea

전정척수반사와 이동운동

한 규 철

가천대학교 의학전문대학원 길병원 이비인후과학교실

Received April 13, 2012

Accepted May 10, 2012

Address for correspondence

Gyu Cheol Han, MD, PhD
Department of Otolaryngology-Head & Neck Surgery, Gachon University of Medicine & Science, Graduate School of Medicine,
1198 Guwol-dong, Namdong-gu,
Incheon 405-760, Korea
Tel +82-32-460-3324
Fax +82-32-467-9044
E-mail hangckr@gmail.com

Unsteadiness that people may continuously experience in everyday life is closely related to unilateral vestibulopathy. In human bipedal gait related to locomotion, supra-spinal control is responsible for gait rhythm. The vestibular system is involved in stable gait directly by adjusting the tension of the antigravity muscles and indirectly by producing information related to a change in the center of gravity according to the angular velocity and position of the head; thus, vestibular disorder gives rise to vestibular ataxia. Vestibular ataxia arises from vestibulo-spinal reflex impairment that changes the movement of the center of gravity in gait initiation, step length, stance width, the timing of ground reaction force, and pre-swing. In this way, information from studies related to locomotion is very important in vestibular rehabilitation.

Korean J Otorhinolaryngol-Head Neck Surg 2012;55:327-33

Key Words Locomotion · Vestibulo-spinal reflex · Ataxia · Rehabilitation.

서 론

전체 인구의 20~30%는 불안정감(unsteadiness)을 경험하며¹⁾ 이는 일상생활에 장애로 작용한다.²⁾ 지속적인 불안정감을 호소한 환자의 65%에서 일측성 전정장애와 관련되며³⁾ 의도적인 동작에서 자세불안을 느끼게 한다.⁴⁾ 이런 증상은 특히 노인들에서 흔하다. 역학조사에 따르면 70세 이상 인구의 35%에서 보행장애를 경험하며, 85세 이상은 80%에 이른다.⁵⁾ 신체평형과 보행에 문제가 발생하면 낙상빈도가 늘어나 신체 움직임이 줄어 삶의 질 저하가 발생할 수 있다. 일반적으로 65세 이상 인구의 30%가 일년에 1회 이상 낙상을 경험하고 서구 양로원의 경우는 50%까지 증가되어 낙상에 대한 공포로 인한 생활의 활동력은 더욱 위축된다.⁵⁾

보행장애의 원인은 다양한 인자에 기인한다. 시각-전정-체성감각 등의 기능저하, 신경학적 퇴행성 변화, 약물이나 술 등에 의한 독성 효과, 혹은 우울증 등이 원인으로 알려져 있다.⁵⁾ 최근 보행분석, 인지기능과의 상관관계분석, 기능적 영상 검사

등과 함께 전정기능검사와 총체적인 노인성 보행장애에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.⁶⁾ 건강한 노인 보행속도는 60세 이상에서 1년에 1%씩 감소하며 최대 보행속도는 병적인 상황에서 보다 더 유의하게 감소한다.⁷⁾ 즉 병적인 상황에서 보행속도 감소와 함께 보행개시(gait initiation)에 문제가 생기고 보행 중 동요는 증가한다.⁸⁾

보행리듬과 관련된 걸음걸이의 부조화를 통칭하는 용어는 운동실조(atxasia)이다. 이는 운동 수의근의 조화로운 운동조절을 못하는 증상으로 신경학적 원인에 기인하며 원인 신경계에 따라 소뇌성(cerebellar ataxia), 감각성(sensory ataxia), 전정성(vestibular ataxia) 운동실조로 분류된다. 소뇌성 운동실조는 일측 혹은 양측 소뇌의 퇴행성 혹은 손상에 의해 길항근 저긴장(antagonist hypotonia), 협동운동장애(asynergy), 측정 이상(dysmetria), 운동개시·정지의 지연(dyschronometria), 운동변환 불능증(dysdiadochokinesia) 등을 주증상으로 한다. 전정소뇌(vestibulocerebellum)의 이상은 안구 운동과 자세의 불안정을 초래하고 척수소뇌(spinocebellum)의 이상은

넓은 보폭 보행, 불안정한 보행의 시작과 정지, 측편위, 불규칙 스텝 등의 보행 특성을 보이고 대뇌소뇌(cerebrocerebellum)의 이상은 기도진전, 구음장애, 운동변환 불능증, 측정이상을 특징으로 한다. 감각성 운동실조는 신체 관절에서 발생되는 위치정보에 대한 체성감각 이상에 기인한다. 체성감각은 척수의 후방 상행로로 연결되어 소뇌, 시상, 측두엽으로 정보를 보낸다. 이 경로 중 어디라도 문제가 생기면 지면반발력을 과도하게 하는 “stomping gait”와 자세 불안을 보이게 되고 시각 의존성이 증가해 롬버그 검사(Romberg test)에 민감하게 반응한다. 반면 전정성 운동실조는 일측 전정기관의 이상에 기인한다. 드물게 양측성 전정질환이 발생한 경우는 운동실조가 오히려 감소하며 만성적인 현기증으로 바뀌게 된다. 이와 같이 보행 이상 혹은 자세이상을 평가하는 것은 전정계를 위시한 신체 균형을 담당하는 다양한 신경계의 총체적 평가 방법으로 이해해야 한다. 자세이상은 비교적 동적 자세 검사⁹⁾라는 친숙한 평가 도구로 잘 알려져 있기 때문에 본고에서는 무게 중심이 빠르게 변하는 보행과 관련하여 발생하는 보행 리듬을 중심으로 논하려 한다. 아직까지 전정계와 관련하여 보행에 관한 연구가 미흡하며 체계화되지 않은 한계가 있다. 따라서 본 논고에서는 전정계와 관련된 보행연구의 역할과 기본적인 용어중심으로 전정질환에 동반되는 보행특성을 기술하고자 한다.

전정척수반사(Vestibulospinal reflex)

신체의 균형은 시각, 전정, 체성감각계 정보가 조화롭게 작동할 때 안정적으로 이루어진다. 특히 정지상태보다는 보행 시 복잡한 신호체계가 작동한다. 즉 네발 보행동물은 척수에 의해 보행리듬이 조절되지만 직립동물에서 양발 혹은 한발로 서거나 보행하는 경우에 상척수회로가 작동하며 이때 전정기관 중 이석기관이 중요한 역할을 하며 낮은 보행속도에서는 더욱 중요한 역할을 한다.^{10,11)} 빠른 보행이나 달리기와 같은 상황에서는 적절한 시각정보와 해마에 이미 내재된 정보에 따른 운동 활성도가 일차적인 정보로 작용하지만^{10,12)} 일반적인 낮은 속도 보행에서 사람의 시각은 비오목와동물(unfoveated animal)처럼 주변시의 특성을 보여 시력의 감소를 보인다.^{13,14)} 반면 머리의 움직임에 대한 각운동과 중력에 대한 상대적 위치변화를 인지하는 전정기관의 반사로는 시각의 반응보다 신속하고 정확하며 특히 전정척수반사로는 자세의 유지에 가장 중요한 역할을 담당한다.¹⁵⁾ 전정척수반사는 전정 신경핵에서 척수를 따라 하행하는 외측 전정척수로와 내측 전정척수로로 나뉜다.

외측 전정 척수신경로(Lateral vestibulospinal tract)

외측 전정척수로는 주로 외전정신경핵에서 기시하여 동측

척수의 모든 분절로 투사한다. 외전정 신경핵은 전-후반고리관, 이석기관, 척수의 체성감각, 소뇌 및 실정핵으로부터 구심성 신호를 받으며, 외전정 신경핵의 전상부에 위치한 신경 세포는 경수부로, 후하부의 신경세포는 요수부로, 중간에 위치한 신경세포는 흥수부로 투사한다. 외측 전정척수로의 신경세포는 acetylcholine과 glutamate의 흥분성 신경 전달 물질을 유리하여 동측의 경부와 사지 신전근을 흥분시키고 굴근은 억제시킨다.

내측 전정 척수신경로(Medial vestibulospinal tract)

내전정신경핵으로부터 기시한 내측 전정척수로는 내측 종속을 경유하여 양측성으로 척수의 제 VII, VIII, IX층으로 투사하여 고유척수뉴론(propriospinal neuron)과 경부의 신근 및 굴근 뉴론과 연접하여 머리를 안정시키는 전정 경반사(vestibulocolic reflex)에 관여한다.

전정척수로 이상에 따른 자세 특성

급성 전정마비는 전정핵 긴장도의 불균형을 초래하여 구역, 구토, 안진, 자세 불안정을 나타낸다. 특히 자세 불안정은 안진의 빠른 방향으로 몸이 쓸리는 주관적 느낌에 이어 이를 보상하기 위해 반대 방향인 병변측으로 몸이 쓸리게 되는 경향을 보인다. 이 과정은 보상적 전정척수반응(vestibulospinal response)에 의한 결과이며 임상적으로 롬버그 검사, 동적 자세검사 등으로 전정기능을 간접적-객관적으로 평가하는 도구로 이용된다.

보행주기(Gait cycle)

보행분석은 주기적으로 반복되는 걸음걸이를 일정한 패턴으로 분석하는 것이다. 특히 하지의 반복적이면서 연속된 진행은 두 개의 분절화된 하지와 몸통 사이의 상호작용과 연관성을 보이기 때문에 다양한 변화를 증명하기 위해서는 3차원적으로 보행을 측정하는 것이 필요하지만 고가의 장비와 많은 공간이 요구되어 최근에는 이를 간소화한 자이로센서나 가속도센서를 이용한 시스템 등이 소개되고 있다.^{16,17)}

보행의 시작은 발뒤꿈치이다. 한쪽 발뒤꿈치에서 다른 쪽 발뒤꿈치까지의 움직임을 스텝이라 한다. 한쪽 발뒤꿈치에서 다른 쪽 발뒤꿈치가 지면에 닿는 동작을 지나 같은 쪽 발뒤꿈치가 지면에 닿는, 즉 두 개의 스텝동작을 스트라이드(stride)라 하며, 이는 보행주기의 한 사이클이 된다(Fig. 1). 보행은 지면과의 접촉 여부에 따라 크게 입각기(stance)와 유각기(swing)로 나뉜다. 다리의 무게 배분 및 동작에 따라서는 weight acceptance, single limb support, limb advancement의 세 시기로 분류한다. Limb movement에 따라서는 initial contact,

loading response, mid-stance, terminal stance, pre-swing, initial swing, mid-swing, terminal swing 등 6가지 시기로 분류할 수 있다.

입각기는 보행 주기 중 발이 지면에 닿아있는 상태를 말한다. 유각기는 보행 주기 중 발이 지면과 떨어져 있는 상태를 말한다. Weight acceptance는 initial contact와 loading response가 포함되고 발이 지면에 닿자마자 발생하는 즉각적인 무게 이동에 따른 앞선 발의 안정성, 진행동작을 유지하는 동시에 충격흡수를 담당한다. Single limb support는 크게 mid-stance 와 terminal stance로 이루어져 있지만 pre-swing도 유각기로의 전환기중에 하나로 single limb support의 일부분으로 고려된다. 이때 반대편 발이 유각기에 있고 모든 신체무게가 무게를 지탱하는 발 한군데에 실린다. Limb advancement는 pre-swing, initial swing, mid-swing, terminal swing이 속하고 이 기간에는 입각기의 발이 지면을 떠나 다음 initial contact

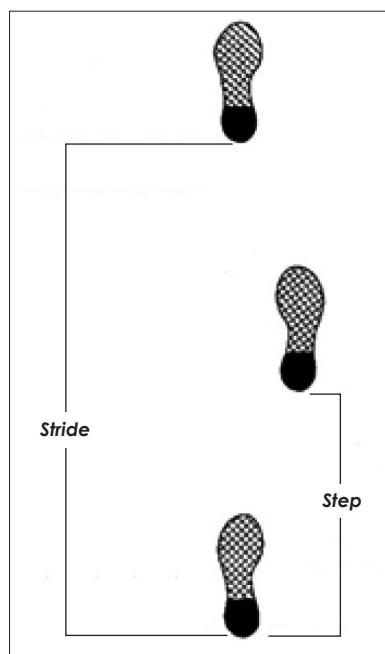


Fig. 1. Stride and step.

을 위한 자세를 취한다. Initial contract은 발뒤꿈치가 지면에 닿는 순간이다. Loading response는 두 발이 지면에 모두 닿아 있는 상태이며, 반대편 발이 들릴때까지 안정성을 유지한다. Mid-stance는 반대편 발이 들리고, 체중이 지면에 닿아 있는 발에 모이는 시기이다. Terminal stance는 지면에 닿아 있는 발뒤꿈치가 들리고 반대편 발뒤꿈치가 지면에 닿기까지의 시기이다. 체중은 지면에 닿아 있는 발의 앞부분으로 모이게 된다. 또한 몸의 전진이 일어나는 시기이다. Pre-swing은 반대편 발의 initial contract가 일어나는 순간부터 이전 발이 지면과 떨어지는 순간까지이다. Initial swing은 이전 발이 지면에서 떨어지면서 몸통의 전진이 일어난다. Mid-swing은 이전 발은 지면에서 떨어져 있다. 무릎굽절이 최대일 때부터 경골이 직각을 이룰때까지의 시기이다. Terminal swing은 경골이 직각이 되는 시점을 지나는 시점부터 무릎이 뒤꿈치 접촉을 위해 완전히 펴는 시점까지이다.

보행시 무게 중심점은 앞과 측면으로 이동한다. 무게 중심점의 상하 이동은 1사이클 중에 2회 발생되며 그 이동의 진폭은 약 5 cm 정도이고, 측방이동은 1보행 주기 중에 좌우 각각 1회 발생하며 그 이동의 진폭은 약 5 cm 정도이다(Table 1).

보행주기 측정방법

정상보행이라 함은 직립 안정성을 유지하면서 신체를 이동시키는 하지의 동작들이 일률적으로 반복되는 것을 일컫는다. 일반적으로 보행분석은 시진으로 10 m 가량의 거리를 보행시켜 팔과 다리 그리고 골반과 가슴의 움직임을 분석하는 과정이며 이를 정량화하기도 한다. 대표적인 정량적 분석인자로는 보행속도와 스텝의 크기가 포함되며 이는 연령에 맞춰 정상치를 갖고 있어야 한다. 보행의 검증을 위해 검사자의 주관에 따라 8가지 항목을 측정하는 동적 보행지수(Dynamic Gait Index)를 이용해 4단계로 구분하여 총 24점 만점에서 19 점 이하에서는 낙상의 위험이 큰 것으로 간주하기도 한다.¹⁸⁾ 고령으로 인한 보행장애의 경우 “senile gait disturbance”라

Table 1. Gait cycle terminology & meaning

Gait cycle (stride)	Limb movement (tasks)	Foot motion (phase)	
Stance phase	Weight acceptance	Initial contact	Beginning of the stance phase, heel contact with the floor
		Loading response	Initial double-limb support
Single limb support	Mid stance		First half of single support: contralateral foot leaves the ground
	Terminal stance		Second half of single limb support: heel rise & contralateral foot contacts on the ground
	Pre swing		Terminal double-limb support begins when contralateral foot contact
Swing phase	Limb advancement	Initial swing	Toe off: maximum knee flexion; body forward moving
		Mid swing	Continued limb advancement and foot clearance; maximum knee flexion-tibia in vertical position
		Terminal swing	Tibia passes beyond perpendicular-full extension of knee for heel contact

고 일컫는다. 하지만 본고에서는 제외하였다.

전정척수로와 이동운동(Locomotion)과의 관계

인체의 보행은 규칙적인 반복을 유지하도록 척수에서 조절된다. 소위 보행주기에 맞춘 중력근-항중력근의 상반된 활동성 조절은 중간 뉴런들에 의해 만들어지며 이를 중추패턴발생기(central pattern generators)라고 칭한다.¹⁴⁾ 100년 전 Thomas Graham Brown의 뇌제거 혹은 뇌간절제술이 시행된 고양이 실험에서, 이런 고양이에서도 정상적인 이동운동이 이루어지는 것을 확인했다.⁵⁾ 이런 현상은 인체에도 동일하지만 독특하게도 양발보행의 경우는 상척수성조절이 더 잘 발달되어 있고, 뇌의 이동운동조절부위와 체성감각 구심경로를 통해 긴밀하게 연결되어 있으며 이를 통해 보행개시, 흔들리지 않고 서기, 방향과 속도변화 등을 정교하게 실행할 수 있다. 보행과 관련된 대뇌피질과의 연관관계는 전두엽의 운동 전 영역과 운동 영역에서 기저핵으로, 그리고 뇌간과 소뇌로 투사되고 최종적으로 척수발생기(autonomous spinal rhythm generators)로 교통한다(Fig. 2).

이동운동에 대한 상척수조절을 위한 전정기관의 직접적

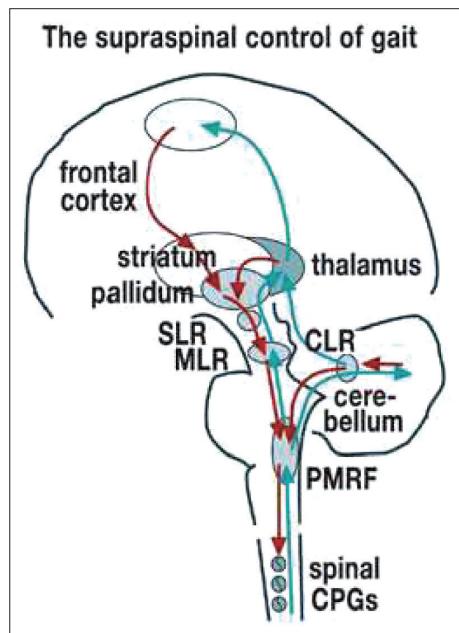


Fig. 2. This diagram shows the current concept of the supraspinal control of human gait. Impulses from the motor and premotor areas of the frontal cortex disinhibit brainstem locomotor areas by way of the basal ganglia. The signal to initiate or alter the pattern of movement travels from the midbrain via the pontomedullary reticular formation to the spinal generators. The rhythm and speed of gait are modulated by the cerebellum. Afferent signals from the limbs (blue) can modulate the pattern of gait through feedback loops, mainly by way of spinocerebellothalamic connections. CLR: cerebellar locomotor region, CPG: central pattern generator, MLR: midbrain locomotor region, PMRF: pontomedullary reticular formation, SLR: subthalamic locomotor region.

역할은 보행의 리듬보다는 항중력근의 조절을 통한 자세조절이나 적절한 무게중심의 이동에 있다. 두발로 서거나 한발로서는 경우 신체하중을 견뎌야 하므로 특히 전정기관은 보행 개시에 영향을 주게 된다.¹⁹⁾ 이런 사항은 양측 미로 절제술을 시행하였던 고양이 연구에서 뚜렷이 볼 수 있다. 즉, 지지면의 미세한 변동을 유발하면 신체 초기 움직임반응에서 후방보상운동과 오버슈트운동이 뚜렷히 유발된다.²⁰⁾ 갈바니자극은 전정척수반사로 및 자세연구에 흔히 사용되는 방법이다. 전정계에 인위적으로 가해지는 전기적 신호는 정적 자세와 동적 자세 모두에 영향을 미친다. 갈바니자극으로 인해 음전극 측의 구심성 전정 신경은 흥분하고, 양전극 측은 감소되며, 반고리관과 이석기관의 구심성 신경은 동일한 반응을 나타내는 것으로 알려졌다.²¹⁻²⁶⁾ 0.6 mA 이상의 전류에서 신체동요를 관찰할 수 있으며 머리가 전방을 향한 자세에서 양전극을 부착한 방향으로 신체동요가 유발된다. 전정밀단의 갈바니자극에 대한 전정 척수반사가 머리 위치에 따라 변화되는데 이는 고개를 돌림으로 인해 전정 경반사가 변형되고 전정 척수반사가 주로 외측 전정신경핵 내의 전정 척수신경원에 연결된 요척수의 중간 신경원의 작용에 의하기 때문일 것이다. 이런 갈바니자극을 이동운동시에 적용시키면 보행개시에 영향을 준다. 즉, 첫 번째 스텝과 상체의 가웃반응에서 일측으로 기울어지는 양상을 보인다.²¹⁾ 하지만 이런 갈바니자극 연구를 바로 환자의 경우와 동일시 할 수는 없다. 갈바니자극은 말단 전정기관을 우회하여 흥분성 혹은 억제성 신호를 만드는 방법이므로 일반적으로 전정 말단에 병인을 갖고 있는 전정 질환과는 다른 양상이기 때문이다.

전정 장애에서 보행분석 결과

전정 장애환자에서 보행개시의 무게중심 변화는 말초성 전정질환과 정상인에서 유의한 차이를 보인다. 이를 확인하기 위한 방법 중 하나로 근전도를 종아리근에 적용시켜보면 보행개시 시점과 반응속도의 차이를 뚜렷이 관찰할 수 있다.^{21,26)} 이 외에도 스텝길이, 보폭, 지면반발타이밍 역시 차이를 보인다. 특히 pre-swing에서 무게 중심의 이동은 전정장애환자에서 다르다. 즉, 후방이동이 유의하게 작으며, 오히려 교정성 전방이동은 크게 나온다. 그리고 내측-외측방향의 지면과 닿은 발쪽으로의 무게 중심 이동이 크게 나타난다(Figs. 3 and 4). 이외에 전정장애환자의 다른 특징은 선행성 전경골근의 폭발적 운동신호가 부족하다는 점이다. 결과적으로 정상적으로 전진할 때 무게 중심 후방이동의 중요한 요소의 결여로 인해 역시 후방이동이 적어진다. 또 다른 특징으로 전정 장애시에 비복근은 유각기에 반대편 입각기에서 강화되는 것을 알 수 있다. 즉, 보행의 시작 시점에서 유의하게 길어진다.^{26,27)} 아울러 이러한

한 현상을 주파수분석을 하면 규칙적인 리듬이 달라졌음을 쉽게 확인할 수 있다(Fig. 5).

양측성 전정장애는 대표적인 보행관련 전정질환으로 써 어둡거나 지면이 고르지 못한 곳에서 보행 불안정감이 증가하며 보행 중에 사물이 흔들려 보이는 증상(oscillopsia)이 심화되어, 보고자 하는 사물을 인지하는 능력이 감소된다.^{19,28)}

보행검사의 임상적 활용

전정질환이 발생된 경우 진단을 위해 일차적으로 전정안반사를 이용한다. 전정척수반사는 전정안반사보다 초기적응이 빠르기 때문에, 측정시점에 따라 다른 결과를 보일 수 있으며 환자의 신체움직임의 급작스런 둔화는 이런 오차를 가중시킬 수 있다. 반면 안반사는 초기적응시점부터 후기 보상

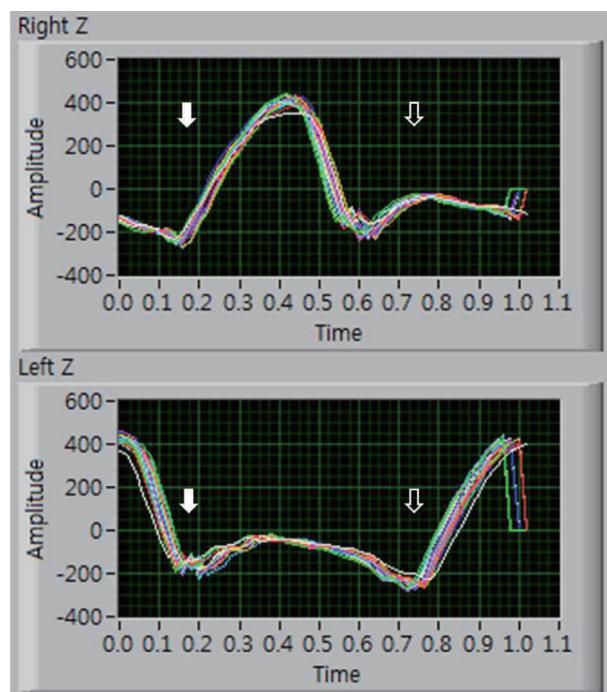


Fig. 3. Normal gait cycle summation result on pitch motion of lower limbs. Upper: right leg; lower: left leg; X-axis: angular velocity of lower limb ($^{\circ}/\text{s}$), Y-axis: time (s); white arrow means initial contact (heel strike), open arrow means preswing (toe off).

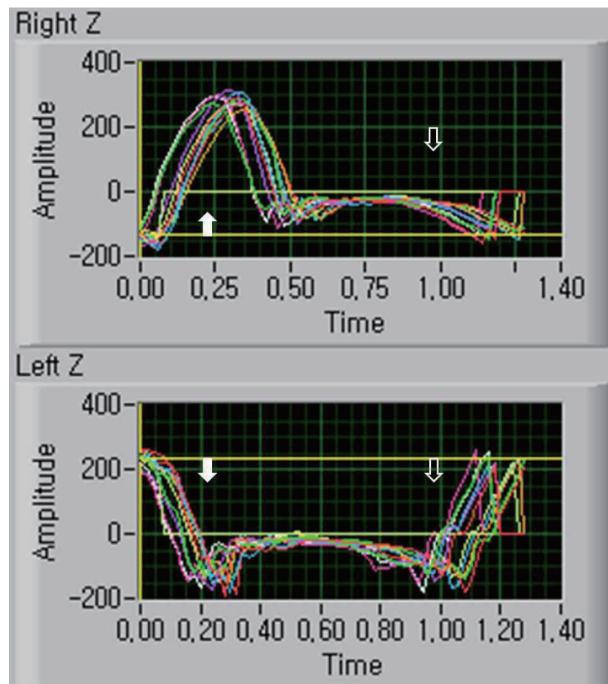


Fig. 4. Gait analysis result of right vestibuloneuronitis. Upper: right leg; lower: left leg; X-axis: angular velocity of lower limb ($^{\circ}/\text{s}$), Y-axis: time (s); white arrow means initial contact (heel strike), open arrow means preswing (toe off). Lesion side initial contact & limb advancement phase shows wide variation.

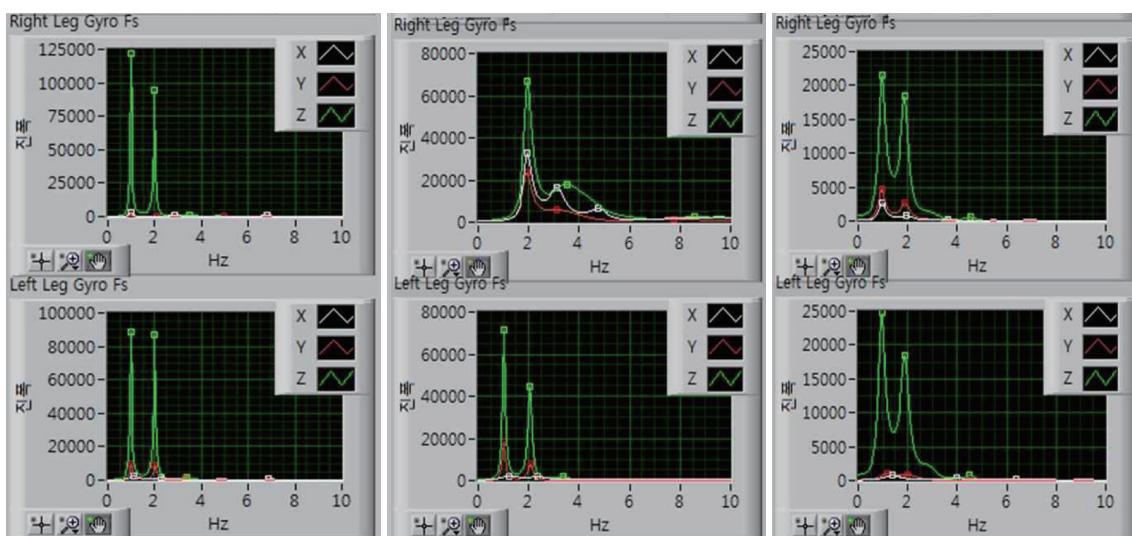


Fig. 5. Gait cycle frequency analysis results. Left one is from health volunteer; middle one is from right vestibuloneuronitis patients; right one is from bilateral vestibulopathy patients; the dominant frequency pattern of abnormal patients were different from normal one.

시기까지 지속적으로 유발시킬 수 있어 전정계의 역동성을 잘 반영한다. 하지만 앞에서 기술한 바와 같이, 신체 균형은 시각-전정-체성감각 전체의 조화로운 상태에서 얻어지는 것이며 특히 전정척수반사가 몸통을 자유공간 내에서 직립으로 유지하도록 하는 역할을 담당하는 관계로 전정척수반사를 종합적으로 평가하는 것은 전정재활치료 측면에서 보았을 때 매우 중요하다. 또한 정적인 자세뿐만 아니라 몸통이 흔들리는 보행 간에 직립을 적절히 유지할 수 있는가 하는 것은 치료에 따른 상태를 잘 반영해주기 때문에, 보행검사를 통해 완성된 전정재활치료를 시도할 수 있다.^{19,29)}

향후 연구 방향

전정기능이 감각기관으로써 이동운동에 작용하기 때문에 자세나 보행에 대한 연구는 이석기관을 이해하는 데 매우 중요한 연구도구로 여겨지고 있다. 하지만 연구의 한계점으로 아직까지도 전정장애에서의 보행특성을 파악하는데 머물고 있으며, 전정보상과정 전체를 아우르는 장기간 연구가 전무한 상황이다. 보행검사는 간단한 검사법이면서 전체 평형상태를 판단할 수 있는 장점을 갖고있음에도 불구하고 급성기에는 환자의 움직임이 둔화되고 이후에는 막연한 공포감과 같은 심리적 요인으로 인해 검사의 표준화가 어렵다는 점이 한계로 작용되고 있다. 따라서 향후 연구방향은 복장형태의 센서를 장착한 평가도구의 개발과 이를 토대로 한 보상과정에 대한 전향적 연구가 이루어져야 할 것이다.

이석기관을 포함하는 전정기관의 평가에 있어서 무중력을 이용한 연구는 가장 이상적인 환경이라고 할 수 있다. 하지만 현실적으로 무중력상에서 *in vivo* 연구를 진행하기에는 많은 시간적 경제적 부담이 따르므로 최근까지 관성회전체를 이용한 “micro g”로 중력을 낮추었을 때 전정계의 반응을 측정하는 방법들이나 유전자 변형 실험동물을 사용하지만 직접적으로 이석기관을 평가한다는 점에서 무중력 연구를 능가할 수는 없다.^{30,31)} 결과적으로 특수환경에서 얻어진 이석기관에 대한 지식과 실제 생활환경에서 느껴지는 어지럼증 사이에 실험적 오차를 줄이고 서로 상보적인 지식의 융합이 이루어져야 할 것이다.

Acknowledgments

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2010-0011858).

REFERENCES

- 1) Nazareth I, Yardley L, Owen N, Luxon L. Outcome of symptoms of dizziness in a general practice community sample. *Fam Pract* 1999; 16(6):616-8.
- 2) Mendel B, Lützén K, Bergenius J, Björvell H. Living with dizziness: an explorative study. *J Adv Nurs* 1997;26(6):1134-41.
- 3) Bath AP, Walsh RM, Ranalli P, Tyndel F, Bance ML, Mai R, et al. Experience from a multidisciplinary “dizzy” clinic. *Am J Otol* 2000;21 (1):92-7.
- 4) Sasaki O, Asawa S, Katsuno S, Usami S, Taguchi K. Gait initiation in bilateral vestibular loss. *Auris Nasus Larynx* 2001;28(4):295-9.
- 5) Jahn K, Zwergal A, Schniepp R. Gait disturbances in old age: classification, diagnosis, and treatment from a neurological perspective. *Dtsch Arztebl Int* 2010;107(17):306-15; quiz 316.
- 6) Lord SR, Sturnieks DL. The physiology of falling: assessment and prevention strategies for older people. *J Sci Med Sport* 2005;8(1): 35-42.
- 7) Ashton-Miller JA. Age-associated changes in the biomechanics of gait and gait-related falls in older adults. In: Hausdorff JM, Alexander NB, editors. *Gait disorders: evaluation and management*. Boca Raton: Taylor & Francis;2005. p.63-100.
- 8) Stolze H, Vieregge P, Deuschl G. [Gait disturbances in neurology]. *Nervenarzt* 2008;79(4):485-99.
- 9) Allum JH, Shepard NT. An overview of the clinical use of dynamic posturography in the differential diagnosis of balance disorders. *J Vestib Res* 1999;9(4):223-52.
- 10) Kingma H. Function tests of the otolith or statolith system. *Curr Opin Neurol* 2006;19(1):21-5.
- 11) Cohen B, Wearne S, Dai M, Raphan T. Spatial orientation of the angular vestibulo-ocular reflex. *J Vestib Res* 1999;9(3):163-72.
- 12) Hüfner K, Strupp M, Smith P, Brandt T, Jahn K. Spatial separation of visual and vestibular processing in the human hippocampal formation. *Ann N Y Acad Sci* 2011;1233:177-86.
- 13) Moeller GU, Kayser C, Knecht F, König P. Interactions between eye movement systems in cats and humans. *Exp Brain Res* 2004;157 (2):215-24.
- 14) Rössert C, Straka H. Interactions between intrinsic membrane and emerging network properties determine signal processing in central vestibular neurons. *Exp Brain Res* 2011;210(3-4):437-49.
- 15) Liao K, Walker MF, Joshi AC, Reschke M, Strupp M, Wagner J, et al. The linear vestibulo-ocular reflex, locomotion and falls in neurological disorders. *Restor Neurol Neurosci* 2010;28(1):91-103.
- 16) Doheny EP, Foran TG, Greene BR. A single gyroscope method for spatial gait analysis. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2010;2010: 1300-3.
- 17) Takeda R, Tadano S, Natoriwa A, Todoh M, Yoshinari S. Gait posture estimation using wearable acceleration and gyro sensors. *J Biomed* 2009;42(15):2486-94.
- 18) Wrisley DM, Marchetti GF, Kuharsky DK, Whitney SL. Reliability, internal consistency, and validity of data obtained with the functional gait assessment. *Phys Ther* 2004;84(10):906-18.
- 19) Horak FB. Postural compensation for vestibular loss. *Ann N Y Acad Sci* 2009;1164:76-81.
- 20) Inglis JT, Macpherson JM. Bilateral labyrinthectomy in the cat: effects on the postural response to translation. *J Neurophysiol* 1995; 73(3):1181-91.
- 21) Bent LR, McFadyen BJ, Inglis JT. Is the use of vestibular information weighted differently across the initiation of walking? *Exp Brain Res* 2004;157(4):407-16.
- 22) Hlavacka F, Horak FB. Somatosensory influence on postural response to galvanic vestibular stimulation. *Physiol Res* 2006;55 Suppl 1:S121-7.
- 23) Grasso R, Ivanenko Y, Lacquaniti F. Time course of gaze influences on postural responses to neck proprioceptive and galvanic vestibular stimulation in humans. *Neurosci Lett* 1999;273(2):121-4.
- 24) Séverac Cauquil A, Martinez P, Ouaknine M, Tardy-Gervet MF. Orientation of the body response to galvanic stimulation as a function of the inter-vestibular imbalance. *Exp Brain Res* 2000;133(4):501-5.
- 25) St George RJ, Fitzpatrick RC. The sense of self-motion, orientation

- and balance explored by vestibular stimulation. *J Physiol* 2011;589 (Pt 4):807-13.
- 26) Bent LR, McFadyen BJ, Inglis JT. Vestibular contributions during human locomotor tasks. *Exerc Sport Sci Rev* 2005;33(3):107-13.
- 27) Bent LR, Inglis JT, McFadyen BJ. When is vestibular information important during walking? *J Neurophysiol* 2004;92(3):1269-75.
- 28) Rinne T, Bronstein AM, Rudge P, Gresty MA, Luxon LM. Bilateral loss of vestibular function: clinical findings in 53 patients. *J Neurol* 1998;245(6-7):314-21.
- 29) Herdman SJ, Schubert MC, Tusa RJ. Strategies for balance rehabilitation: fall risk and treatment. *Ann N Y Acad Sci* 2001;942:394-412.
- 30) Clément G, Reschke M, Wood S. Neurovestibular and sensorimotor studies in space and Earth benefits. *Curr Pharm Biotechnol* 2005; 6(4):267-83.
- 31) Clarac F, Vinay L, Cazalets JR, Fady JC, Jamon M. Role of gravity in the development of posture and locomotion in the neonatal rat. *Brain Res Brain Res Rev* 1998;28(1-2):35-43.