



이 형

계명대학교 의과대학 신경과학교실

Autonomic and Vestibular System Interaction

Hyung Lee, MD, PhD

Department of Neurology, Brain Research Institute, Keimyung University School of Medicine, Daegu, Korea

Increasing evidences have demonstrated that the vestibular system participates in autonomic regulation, especially adjusting cardiovascular control during body movement and change in posture. Animals with bilateral vestibular lesion are more susceptible to posturally related hypotension than vestibularly intact animals. Recent study suggested that acute vestibular neuritis can interfere with cardiovascular autonomic response in human. In addition to cardiovascular autonomic dysfunction, patients with vestibular lesions could also be more vulnerable to respiratory disturbances related to posture such as obstructive apnea. Even sleep disturbance might be connected with vestibular disorders because neurons in the pontine reticular formation that are critical in switching between sleep states may be influenced by labyrinthine inputs. This review aims to highlight recent advances on autonomic dysfunction in the vestibular disorders. It is especially focused on cardiovascular dysfunction as an underestimated sign of vestibular disorders.

Key Words: Vestibular disorders, Autonomic dysfunction, Cardiovascular autonomic control, Vertigo

서 론

전정계의 신호가 자율신경계에 작용하여 신체의 항상성(homeostasis)에 관여한다는 증거는 동물 실험 및 전정신경계 병변을 가진 환자를 대상으로 한 연구에서 보고되고 있다.^{1,2}

신체의 움직임은 심혈관계 및 호흡계에 중력에 의한 기계적 변동을 초래하는데, 체위의 변동은 시각, 체성감각, 자율신경로, 전정신호 등 구심성 신경로를 통해 중추신경계로 전달되어 혈관 및 심박동, 호흡근에 적절한 반응을 유도함으로써 신체의 변동에 따라 위협받는 항상성을 교정할 수 있게 해준다. 이때 전정계는 다른 구심성 신호보다 빠른 구심성 신호를 중추신경계로 전달함으로써 즉각적인 적응에 기여한다.³

전정자극은 심혈관계, 호흡계 뿐만 아니라 뇌간의 mono-

aminergic 신경군에 대한 영향으로 각성상태(arousal)^{4,5}의 변화를 초래할 수 있고, 뇌간 신경세포의 흥분성에 영향을 주어 수면-각성 주기(sleep-waking cycles)⁶를 변화시키며, 멀미에 대한 오심, 구토⁷를 유발하는 등 자율신경계 조절에 변화를 초래할 수 있다는 것이 보고되었으며 이에 대한 연구들이 진행되고 있다.

한편, 전정계의 병변에 의해 나타나는 자율신경계의 동요는 급성기에만 나타났다가 없어지게 되어 만성적인 미로 부전(labyrinthine failure)의 경우 이러한 동요현상을 보이지 않으나, 전정신경을 절제함과 동시에 소뇌의 목젖(uvula)을 파괴하거나, 중추전정신경계인 전정신경핵을 파괴한 경우 이러한 동요가 지속되는 현상을 보이게 된다.⁸⁻¹⁰ 이는 중추신경계의 이소성(plasticity)에 전정신경핵과 소뇌의 목젖이 중요한 역할을 담당한다는 것을 의미한다.

본 고에서는 전정계가 심혈관계와 호흡계에 미치는 영향에 대한 실험적 연구들에 대해 고찰하고 전정계 병변을 가진 환자에서 나타나는 현상과 이의 임상적 의의 등에 대해 논하고자 한다.

Hyung Lee, MD, PhD

Department of Neurology, Keimyung University School of Medicine,
194 Dongsan dong, Daegu 700-712, Korea

Tel: +82-53-250-7835, FAX: +82-53-250-7840

E-mail: hlee@dsmc.or.kr

심혈관 기능에 대한 전정계의 영향(vestibular effects on cardiovascular function)

심혈관계는 중력에 민감하여 체위가 변동되면 심장으로부터 들어오는 정맥혈류의 심대한 변화를 초래할 수 있다. 심장으로부터 들어오는 정맥혈류의 감소는 심장 충혈(cardiac filling)의 감소, 심박출량(cardiac output)의 감소를 초래하고 이로 인한 뇌혈류의 감소는 기립성 저혈압을 일으킬 수 있다.

이러한 기립성 저혈압에 의한 뇌혈류의 부전을 방지하기 위하여 자율신경계는 부교감 신경에 의하여 억제되고 있던 심장의 정맥동(sinus node)을 풀어 심박동을 증가시켜 심박출량을 늘리고, 교감신경을 활성화시켜 말초혈관의 저항성을 증가시킴으로써 혈압을 올린다. 전신 혈압은 대동맥에 있는 대동맥체(aortic body, 미주신경의 구심성분)와 경동맥동(carotid sinus)에 있는 경동맥체(carotid body, 설인신경의 구심성분)에 의해 전달되어 뇌간의 고립핵(nucleus solitarius)에서 통합(integration)된다. 고립핵은 심혈관계, 호흡계, 그리고 다른 내장성분으로부터 오는 구심성 신호를 받는다.¹¹ 체위의 변동에 대한 신호는 시각계(visual), 체감각계(somatosensory), 전정계를 통해서 전달되는데, 전정계에서 오는 신호는 내전정핵(medial vestibular nucleus)으로 전달되어 고립핵과 등쪽 미주신경 운동핵(dorsal motor nucleus of vagus), 문측 복외측연수(rostromedullary medulla)로 전달되어 전정-교감반사(vestibulocardiac reflex)에 관여한다.¹² 이때 문측 복외측연수로 전달되어지는 신호는 세 반고리관 보다는 이석수용체(otolith receptors)에서 감지된 신호가 작용한다(Fig. 1).¹³

전정계가 심혈관계 조절에 미치는 영향에 대해서는 그동안 광범위한 동물실험이 진행되었다. 전정-심혈관계 조절에 대한 연구들은 전정신경을 전기적으로 자극한 후 말초 혈류의 변화를 측정하거나 말초 교감신경 활성도를 측정한 실험이 있고, 체위를 변동시켜 전정계의 자극에 대한 반응을 측정하는 실험이 있었다.

고양이의 미로 수용체를 자극하여 말초 혈류의 변화를 측정한 실험에서 미로 수용체의 전기적 자극은 교감신경계의 혈관수축성 신호를 증가시키고 이로 인한 동맥혈관의 혈류량 변화가 관찰되었다.^{14,15} 상완동맥(brachial artery), 대퇴동맥(femoral artery), 장간막 동맥(mesenteric artery) 혈류량의 변화는 특정한 양상을 보였는데, 하지로 가는 동맥혈류량의 감소는 상지동맥혈류량의 감소에 비해 현저하였다. 전정 자극에 의해 변화되는 이러한 교감신경성 혈관조절은 체위

의 변동에 따른 심혈관계의 부담을 줄여 급격한 혈압의 변동 없이 중력에 의한 변화에 적절하게 적응하도록 해준다.

네발 짐승(quadrupeds)에서 두위거상(head-up tilts)을 시키면 사람에서와 마찬가지로 정맥혈의 재분배가 하지와 복부내장 쪽으로 일어나게 되며 이로 인해 심장으로부터 들어오는 혈류량이 감소하게 되는데 이때, 즉각적인 말초혈관의 수축이 일어나지 않는다면 혈압이 떨어지게 된다. 정상인에서는 압력반사(baroreflex)와 함께 전정-교감신경반사(vestibulocardiac reflex)가 작용하여 심장으로부터의 정맥혈류 증가, 심박출량 증가, 혈압의 증가를 일으켜 중요 장기로 가는 혈류량이 줄어들지 않게 함으로써 항상성을 유지한다.¹⁶

전정계는 이러한 체위변동의 초기에 말초혈관을 조절하는 교감신경성 신호를 증가시켜 말초혈관을 수축시킴으로써 심장으로부터의 혈류량을 정상화시키게 된다. 전정미로를 파괴하거나 전정신경을 절단한 고양이에서는 이러한 기립성 stress에 대하여 비정상적인 반응이 관찰되는데 그림 1A에서와 같이 전정신경 절단 후 첫 일주일 간은 기립시 초기에 나타나

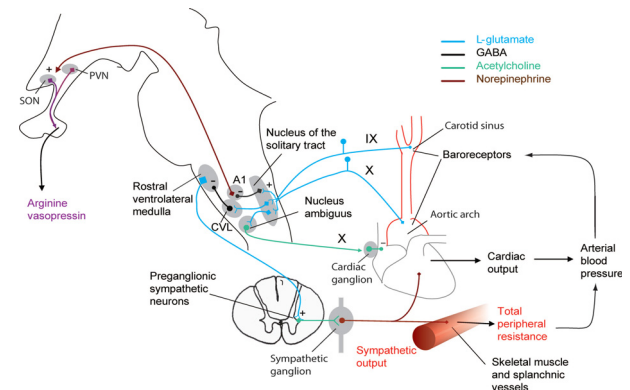


Figure 1. The arterial baroreceptors are mechanoreceptors located in the carotid sinuses (innervated by the glossopharyngeal nerve, IX) and aortic arch (innervated by the vagus nerve, X) that respond to stretch elicited by increase in arterial pressure. Primary baroreceptor afferents provide monosynaptic excitatory input to the nucleus of the solitary tract. Barosensitive NTS neurons initiate a sympathoinhibitory pathway that involves a projection from the NTS to interneurons in the caudal ventrolateral medulla (CVL) that send an inhibitory projection to sympathoexcitatory neurons located in the rostral ventrolateral medulla. The baroreflex-cardioinhibitory pathway involves a direct input from the NTS to a group of vagal preganglionic neurons located in the ventrolateral portion of the nucleus ambiguus (NA). These neurons project to the cardiac ganglion neurons that elicit bradycardia. The baroreflex, via the NTS, also inhibits secretion of arginine vasopressin by magnocellular neurons of the supraoptic (SON) and paraventricular (PVN) nuclei of the hypothalamus, in part by inhibiting noradrenergic cells of the A1 group.

는 혈압의 하강이 현저하게 나타나며 이의 교정이 일어나지 않게 된다.¹⁶ 한편, 이러한 전정교감신경계의 불균형은 시각 자극을 제거한 상태에서 더 현저하게 나타나는데, 이는 시각에 의한 보상을 의미한다. 또한, 이러한 심혈관계의 불안정성은 전정절제술 후 1주일 안에 보상되어 그 이후에는 정상적인 반응이 나타나게 된다.¹⁶ 이에 반하여 중추성 전정계를 파괴시키면 체위의 변동에 의한 심혈관계의 이상반응이 영구히 남게 된다. 소뇌의 등쪽벌레(dorsal cerebellar vermis)를 제거하고 양측 전정신경을 절단한 후 같은 실험을 시행하면 전정신경만을 제거한 경우와 같이 약 1주일 정도의 심혈관계 이상 반응만 보이지만, 소뇌 목젖과 양측 미로를 제거하거나¹⁰ 양측 전정신경핵을 제거한 경우는¹⁷ 실험 종료시인 한 달 까지 이상반응이 지속되는 것을 보였다. 이러한 결과는 말초 전정계의 손상이 있는 후 체위변동에 의한 심혈관계의 이상반응이 회복되는 과정에서 소뇌목젖이 중추신경계의 이소성(plasticity)에 있어서 필수적이며, 중추 전정계가 파괴되면 회복이 일어나지 못하게 됨을 의미한다.

전정신경핵에 화학적 파괴를 가한 후 체위변동에 의한 심혈관계의 이상반응을 관찰한 결과 자율신경조절에 중요한 전정신경핵의 부위는 외전정핵의 아래쪽에 위치한 내전정핵과 하전정핵에 위치하는 것으로 밝혀졌다.⁸ 이 때에는 시각의 유무에 관계없이 심혈관계의 신속적응이 되지 않는 것이 관찰되었고, 즉각적인 회복 없이 영구적인 손상을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 미로박탈 이후 심혈관계 이상반응의 회복에 중요한 적응 이소성(adaptive plasticity)은 아래쪽 전정핵이 담당한다는 것을 의미한다.

전정자율신경계 조절의 임상적 의의 (clinical implications of vestibulo-autonomic regulation)

전정계가 과도하게 자극되면 오심, 구토, 침의 분비, 전신적 불쾌감, 무기력, 하품, 창백, 식은땀, 등 소화기, 호흡, 심혈관계의 반응을 유발하게 되며 이러한 자율신경 증상의 유발은 과도한 자극에 대한 신체 방어기전의 하나로 생각된다.¹⁸ 급성 전정 병변에 의한 이러한 증상들에 대한 최근의 연구들은 전정질환, 불안증(anxiety)과 자율신경증상의 관계, 전정-자율신경계 조절이 발생하는 신경해부학적 구조 등에 대해 초점이 맞춰지고 있다. 특히, 부완핵(parabrachial nucleus)과 변연계(limbic system) 사이의 연결이 불안증의 정도에 영향을 주고, 전정계, 자율신경계, 그리고 신경행동학적 반응에 기여할 것이라고 추정되고 있다.¹⁹ 또한, 만성 전정

병변이 있는 환자에서 기립불내성(orthostatic intolerance), 만성적 어지럼 등이 발생하는 것은 전정-자율신경 조절의 이상에 기인하는 것으로 생각되고 있다.² 전정병에 의한 공황장애(panic disorder)가 발생하는 것과 공황 발작(panic attack)에 의해 어지럼이 발생하는 것, 오심, 멀미 또한 중추 자율신경계의 이상적응에 의한 것일 수 있다.^{20,21} 이처럼 전정계 질환의 진단에 있어 인체에서 발생하는 전정-자율신경 조절에 대한 이해는 임상적으로 중요한 의미를 가지지만 사람에서의 연구는 아직 몇몇 문제점들이 있어 쉽게 이해되지 못하고 있다. 공황발작시 환자는 보통 과호흡(hyperventilation)의 양상을 보이게 되고 이로 인해 어지럼을 느끼게 되는데 어지럼이 있는 환자에서 공황발작에서와 같이 과호흡을 보이는 경우도 있다.²² 과호흡이 평형의 이상을 발생시키는지에 대한 연구로 정상인과 미로의 이상이 있는 환자에게 일정한 양상의 과호흡을 시켰더니 정상인과 미로환자 모두에서 같은 양상의 자세 불안과 신체동요가 관찰되었다.²³ 이는 과호흡에 의한 자세 불안은 전정계에 의한 것이 아니라는 것을 의미한다. 과호흡을 시킨 후 전정근 유발전위(vestibulo-myogenic potential)를 측정하였을 때 변화가 없었다는 점 또한 이를 뒷받침해 준다.²⁸ 이는 과호흡 후 어지럼을 느끼는 것은 전정신호에 의한 것이 아니라 중추신경계에 영향을 미쳐서 발생하는 것 이므로 전정손상 후 어지럼에 의해 과호흡을 하게 되면 중추신경에 의한 보상과정에 영향을 끼칠 수 있음을 시사한다.²⁴

따라서 과호흡에 의해 어지럼을 느끼는 환자의 진찰에 있어 전정신경초종과 같이 안진을 동반하는 어지럼인지²⁵ 과호흡에 의한 중추신경계의 변화로 인한 어지럼인지를 감별하는 것이 중요하다.

정상인에서는 전정자극에 의해 호흡수가 변화하는 것이 관찰되는데 미로가 망가진 환자에서는 이러한 현상이 관찰되지 않는다.^{26,27} 이는 전정신호가 신체의 움직임에 감지하여 호흡과 심장의 적절한 반응을 유도한다는 증거인데, 전정병변을 가진 환자에서 과호흡을 동반한 공황발작을 일으킬 수 있다는 생리적 증거가 될 수 있고, 이러한 환자에서 두부의 움직임에 의해 심박수와 호흡수가 현저히 증가하는 양상을 보인다.²⁸

사람에서 전정자극에 의한 심혈관계의 변화를 관찰하는 것은 동물실험에 비하여 몇 가지 어려운 점이 있는데, 호흡에 의해 심박동 및 혈압이 변동된다는 것이다. Caloric 자극에 대한 심박동수의 변화를 측정할 연구에서 메트로놈을 이용하여 호흡수를 일정하게 유지한 경우 유의한 심박동수의 변화

가 감지되지 않았다.²⁹ 따라서 호흡의 변화에 따른 심혈관계의 반응을 배제한 전정-심혈관 반응만을 측정하기 위하여 특별한 장치를 고안하여 심박동의 변화를 측정하였더니 심박동수의 증가가 관찰되었다.^{30,31} 환자를 앙와위로 눕힌 상태에서 심전도의 R파가 기록된 후 다양한 시간간격을 두고 머리를 약 10 cm 정도 아래로 수동적으로 떨어뜨려서 R-R간격의 변화를 측정하여 심박수의 변화 및 잠복기를 측정하여 전정-심장 반사의 잠복기를 추정하였다.³² 정상인에는 약 500 ms 정도의 잠복기를 가지며 반응하는 심박동의 변화가 관찰되었으나 미로이상을 가진 환자에서는 이러한 반응이 관찰되지 않았다. 혈압과 말초혈류의 변화는 정상인 및 미로이상 환자에서 2-3 박동 후에 모두 관찰되었다.³³ 이는 심박동수의 변화는 전정신호를 이용하여 빠른 반응을 보이고 혈압과 말초혈류의 변화에는 전정신호가 아닌 다른 신호를 이용한다

는 것을 의미한다.³³ 이 밖에 전정-심혈관 반응에 대한 연구가 microneurography를 이용하여 근육교감신경활동전위(muscle sympathetic nerve activity: MSNA)를 측정함으로써 진행되었는데 전정자극에 의해 MSNA가 증가하는 양상을 보임으로써 체위의 변동이 말초혈관을 수축시켜 혈압을 올리는데 기여한다는 것을 증명하였으나, 미로이상을 보인 환자에서는 시행하지 않았었고 전정기관에 대한 자극이 적절하였는지에 대해서 논란이 있다.^{34,35}

사람에서 전정-자율신경계 조절에 대한 연구의 또 다른 제한점은 급성 전정병변의 경우 중추신경계에 의한 보상이 매우 빨리 일어나고 급성기 환자는 검사에 대해 협조가 적절히 되지 않는다는 점이다. 최근 Jauregui-Renaud 등이 전정신경염 환자에서 자율신경기능을 검사하여 유의한 결과를 얻었다.³⁵ 전정신경염의 증상을 보인지 48시간 안에 검사를 시행

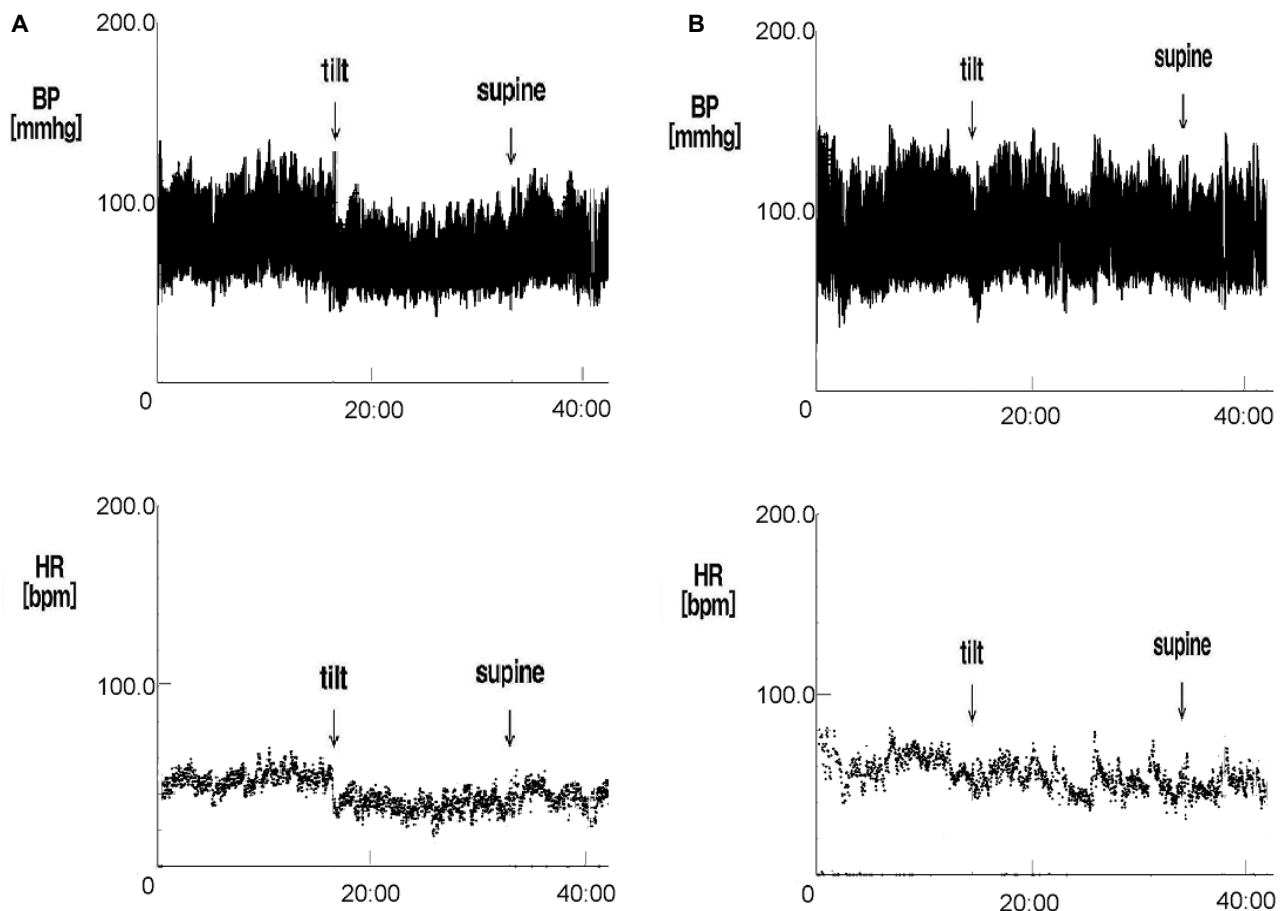


Figure 2. Beat to beat BP and HR recording in a patient with acute vestibular neuritis. During the tilting, there was persistent orthostatic hypotension in acute vestibular neuritis (A). Follow up tilt test performed 2 weeks after onset of symptom showed no orthostatic hypotension during tilting (B).

하였고 모두 반고리관의 기능 이상이 증명된 7명의 환자와 정상 대조군을 대상으로 찬물에 손을 담그는 자극과 기립자극에 의한 말초혈관의 교감신경반응을 조사하였는데, 환자군에서 유의한 혈압의 변화를 관찰하였다.³⁵ 이러한 변화는 2주일 후에 사라졌는데, 이는 전정신경염 후 안진의 감소와 균형 이상의 감소가 사라지는 시기와 일치하므로 동일한 기전으로 중추신경계에 의해 보상된다는 것을 의미한다. 본 교실에서도 급성 전정신경염 환자의 기립경사검사서 기립성 저혈압이 관찰되었으나 2주 후 대부분에서 정상화된 소견을 관찰 하였다(Fig. 2). 이는 Jauregui-Renaud 등의 보고와 일치하는 소견으로 전정계가 심혈관계 기능을 조절함을 의미하는 소견이다.

결 론

동물실험 및 인간을 대상으로 조사된 바와 같이 전정계는 자율신경계에 영향을 주어 공간에서 신체의 움직임에 대하여 적절한 생리적 반응을 유도함으로써 항상성을 유지할 수 있도록 한다. 급성 전정계 병변을 가지는 환자에서 심혈관계 및 호흡계에 미치는 영향은 여러 가지 요인에 의해 감소되어 비록 미세한 변화만을 보이지만 급성전정 이상을 보이는 환자의 진료에 있어 이를 인식하는 것은 급격한 자세의 변동에 의한 혈압의 변화나 고혈압 약물 투여에 주의를 요할 수도 있다는 점에서 임상적으로 중요하다. 또한, 전정-자율신경계의 상호작용에 대한 이해는 임상에서 자주 접하게 되는 만성 어지럼 환자의 진료에 있어 전정계 이상에 의한 어지럼뿐만 아니라 자율신경계 이상에 의한 어지럼을 감별하는 데에도 도움을 준다. 급성 말초성 전정병변에 의한 전정안반사와 전정자세반사의 회복과 전정자율신경계 이상의 회복이 같은 시간 안에 이루어진다는 점은 중추신경에 의한 보상기전이 빨리 일어난다는 것을 의미하며, 비록 자세한 기전은 알려지지 않았지만 동물실험에서 밝혀진 바와 같이 소뇌의 목젓이 전정-자율신경 조절 이상의 회복에 있어 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 내전정핵의 하부가 체위변동에 대한 전정성, 시각성, 체성감각성 구심성 신호에 대하여 중요한 통합기능을 한다는 것과 전정성 신호의 소실에 대하여 다른 구심성 감각신호가 전정 손상 후의 회복에 중요한 역할을 담당할 수 있다는 점에 대해 향후 인간을 대상으로 한 연구가 더욱 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

1. Yates BJ, Sklare DA, Frey MA. Vestibular autonomic regulation: overview and conclusions of a recent workshop at the University of Pittsburgh. *J Vestib Res* 1998;8:1-5.
2. Furman JM, Jacob RG, Redfern MS. Clinical evidence that the vestibular system participates in autonomic control. *J Vestib Res* 1998;8:27-34.
3. Yates BJ, Stocker SD. Integration of somatic and visceral inputs by the brainstem: functional considerations. *Exp Brain Res* 1998; 119:269-275.
4. Furman JM, Balaban CD, Jacob RG. Interface between vestibular dysfunction and anxiety: more than just psychogenicity. *Otol Neurotol* 2001;22:426-427.
5. Jacob RG, Furman JM, Durrant JD, Turner SM. Panic, agoraphobia, and vestibular dysfunction. *Am J Psychiatry* 1996; 153:503-512.
6. Hobson JA, Stickgold R, Pace-Schott EF, Leslie KR. Sleep and vestibular adaptation: implications for function in microgravity. *J Vestib Res* 1998;8:81-94.
7. Yates BJ, Miller AD, Lucot JB. Physiological basis and pharmacology of motion sickness: an update. *Brain Res Bull* 1998;47:395-406.
8. Mori RL, Cotter LA, Arendt HE, Olsheski CJ, Yates BJ. Effects of bilateral vestibular nucleus lesions on cardiovascular regulation in conscious cats. *J Appl Physiol* 2005; 98:526-533.
9. Wilson TD, Cotter LA, Draper JA, Misra SP, Rice CD, Cass SP, et al. Effects of postural changes and removal of vestibular inputs on blood flow to the head of conscious felines. *J Appl Physiol* 2006;100:1475-182.
10. Holmes MJ, Cotter LA, Arendt HE, Cass SP, Yates BJ. Effects of lesions of the caudal cerebellar vermis on cardiovascular regulation in awake cats. *Brain Res* 2002; 938:62-72.
11. Yates BJ, Kerman IA. Post-spaceflight orthostatic intolerance: possible relationship to microgravity-induced plasticity in the vestibular system. *Brain Res* 1998;28:73-82.
12. Kerman IA, Yates BJ, McAllen RM. Anatomic patterning in the expression of vestibulosympathetic reflexes. *Am J Physiol* 2000;279:R109-117.
13. Yates BJ, Miller AD. Properties of sympathetic reflexes elicited by natural vestibular stimulation: implications for cardiovascular control. *J Neurophysiol* 1994;7:2087-292.
14. Kerman IA, McAllen RM, Yates BJ. Patterning of sympathetic nerve activity in response to vestibular stimulation. *Brain Res Bull* 2000;53:11-16.
15. Kerman IA, Emanuel BA, Yates BJ. Vestibular stimulation leads to distinct hemodynamic patterning. *Am J Physiol* 2000;279:R118-125.
16. Jian BJ, Cotter LA, Emanuel BA, Cass SP, Yates BJ. Effects of bilateral vestibular lesions on orthostatic tolerance in awake cats. *J Appl Physiol* 1999;86:1552-1560.
17. Jian BJ, Acernese AW, Lorenzo J, Card JP, Yates BJ. Afferent pathways to the region of the vestibular nuclei that participates in cardiovascular and respiratory control. *Brain Res*

- 2005;1044:241-50.
18. Lee TG, Sung KB. Vestibular autonomic regulation, Lee JG, Kim JI, Park HM ed, Dankook University Press; 2004.
19. Balaban CD, Thayer JF. Neurological bases for balanceanxiety links. *J Anxiety Disord* 2001;15: 53-79.
20. Balaban CD. Vestibular autonomic regulation (including motion sickness and the mechanism of vomiting). *Curr Opin Neurol* 1999;12:29-33.
21. Balaban CD. Projections from the parabrachial nucleus to the vestibular nuclei: potential substrates for autonomic and limbic influences on vestibular responses. *Brain Res* 2004; 996:126-137.
22. Yates BJ, Bronstein AM. The effects of vestibular system lesions on autonomic regulation: observations, mechanisms, and clinical implications. *J Vestib Res* 2005;15:119-129.
23. Sakellari V, Bronstein AM. Hyperventilation effect on postural sway. *Arch Phys Med Rehabil* 1997;78:730-736.
24. Sakellari V, Bronstein AM, Corna S, Hammon CA, Jones S, Wolsley CJ. The effects of hyperventilation on postural control mechanisms. *Brain* 1997;120:1659-1673.
25. Choi KD, Cho HJ, Koo JW, Park SH, Kim JS. Hyperventilation-induced nystagmus in vestibular schwannoma. *Neurology* 2005;64:2062.
26. Jauregui-Renaud K, Gresty MA, Reynolds R, Bronstein AM. Respiratory responses of normal and vestibular defective human subjects to rotation in the yaw and pitch planes. *Neurosci Lett* 2001;298:17-20.
27. Thurrell A, Jauregui-Renaud K, Gresty MA, Bronstein AM. Vestibular influence on the cardiorespiratory responses to whole-body oscillation after standing. *Exp Brain Res* 2003; 150:325-331.
28. Yardley L, Gresty M, Bronstein A, Beyts J. Changes in heart rate and respiration rate in patients with vestibular dysfunction following head movements which provoke dizziness. *Biol Psychol* 1998;49:95-108.
29. Jauregui-Renaud K, Yarrow K, Oliver R, Gresty MA, Bronstein AM. Effects of caloric stimulation on respiratory frequency and heart rate and blood pressure variability. *Brain Res Bull* 2000;53:17-23.
30. Radtke A, Popov K, Bronstein AM, Gresty MA. Evidence for a vestibulo-cardiac reflex in man. *Lancet* 2000;356 :736-737.
31. Radtke A, Popov K, Bronstein AM, Gresty MA. Vestibuloautonomic control in man: Short- and long-latency vestibular effects on cardiovascular function. *J Vestib Res* 2003;13:25-37.
32. Kaufmann H, Biaggioni I, Voustianiouk A, Diedrich A, Costa F, Clarke R, et al. Vestibular control of sympathetic activity. An otolith-sympathetic reflex in humans. *Exp Brain Res* 2002;14:463-369.
33. Voustianiouk A, Kaufmann H, Diedrich A, Raphan T, Biaggioni I, Macdougall H, et al. Electrical activation of the human vestibulo-sympathetic reflex. *Exp Brain Res* 2006;171: 251-1261.
34. Ray CA, Carter JR. Vestibular activation of sympathetic nerve activity. *Acta Physiol Scand* 2003;177:313-19.
35. Jauregui-Renaud K, Hermosillo AG, Gomez A, Marquez MF, Cardenas M, Bronstein AM. Vestibular function interferes in cardiovascular reflexes [corrected]. *Arch Med Res* 2003;34: 200-204.