두부외상 후 어지럼 환자에서의 전정 재활

김성균, 홍석민

한림대학교 의과대학 동탄성심병원 이비인후-두경부외과

Vestibular Rehabilitation after Traumatic Head Injury with Dizziness

Sung Kyun Kim, Seok Min Hong

Department of Otolaryngology-Head and Neck Surgery, Hallym University Dongtan Sacred Heart Hospital, Hallym University College of Medicine, Hwaseong, Korea

• Received May 7, 2019
Revised May 17, 2019
Accepted June 1, 2019

• Corresponding Author:
Seok Min Hong
Department of Otorhinolaryngology-Head
and Neck Surgery, Hallym University
Dongtan Sacred Heart Hospital,
Hallym University College of Medicine,
7 Keunjaebong-gil, Hwaseong 18450, Korea
Tel: +82-31-8086-2670
Fax: +82-31-8086-2681
E-mail: thecell20@gmail.com
ORCID code:
https://orcid.org/0000-0001-7999-6258

• Copyright © 2019 by
The Korean Balance Society.
All rights reserved.

• This is an open access article distributed under the terms
of the Creative Commons Attribution Non-Commercial
License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)
which permits unrestricted non-commercial use, dis-
tribution, and reproduction in any medium, provided the
original work is properly cited.

The vestibular symptoms such as dizziness and imbalance that occurred after traumatic head/brain injury were caused by a combination of central factors such as abnormalities of white matter, diffuse axonal injury and microhemorrhage, and peripheral factors like decreased vestibulo-ocular reflex caused by the energy transmitted to the semicircular canal and otolith organs. These symptoms can affect on the patient's overall physical, cognitive, emotional, and quality of life. There have been reports that vestibular rehabilitation for the treatment of dizziness and imbalance after head trauma can promote vestibular compensation, stabilize of the gaze movements, and also affect the treatment outcomes of the associated injuries. The frequency, duration, and number of people participating in vestibular rehabilitation varied with each study, and physical therapy, occupational therapy, cognitive counseling, medication treatment, duration of treatment for associated injuries were also variable. Most studies have shown that many patients who get the vestibular rehabilitation have a significantly reduced time to return to work and sports activities, and may be able to speed up the recovery of vestibular symptoms. However, further research is needed on its long-term effects. In addition, patients with traumatic head/brain injuries are more susceptible to injuries of other organs as well as vestibular disorders, therefore consideration of treatment planning for associated injuries including precise evaluation mental support, and cognitive therapy is expected to be more effective with vestibular rehabilitation therapy.

Res Vestib Sci 2019;18(2):32-37

Keywords: Vestibule; Dizziness; Rehabilitation; Injury; Head

서 론

외상성두부손상(trumatic brain injury, TBI)은 두부의 둔상(blunt head trauma) 또는 폭발 시 노출(blast exposure)에 의해 발생하며, 의식 소실이나 변화, 신경학적 징후 및 증상이 발생하는 경우로 정의된다[1]. TBI는 두개 내 출혈, 골절, 경추 손상, 기도 손상과 같은 심각한 손상이 있는 경

우에는 수술적 치료가 된다. 하지만, Glasgow Coma Score가 13점 이상이거나, 1시간 이하의 의식 소실, 수술적 치료가 필요하지 않는 경미한 두부손상(mild TBI, mTBI)의 경우 대증적 치료를 통해 두개 내 또는 전신적인 합병증의 발생을 추적 관찰하는 것이 주된 치료이다. 외상성두부손상은 외부로부터의 다양한 방향의 힘이 동시에 유입되므로 손상 부위에 따라 호소하는 주 증상이 다를 수 있지만,

두부외상 후 약 23.8%~81%의 환자들이 수주, 수개월에서 드물게는 수년 동안 어지럼(dizziness), 현훈(vertigo), 불균형(imbalance)과 같은 증상들을 호소하며, 이는 환자의 전반적인 신체, 인지, 감정조절 기능 및 삶의 질에 많은 영향을 미칠 수 있다[2-4]. 두부외상 후 어지럼, 불균형과 같은 증상들은 수상 직후부터 수시간 내에 시작되는 경우가 많으며, 다양한 형태와 강도로 나타난다[5]. 대부분의 환자들은 침상 안정을 위해 보행 및 이동이 제한된 상태이며, 이동이 가능하더라도 경부, 척추 동반 손상으로 인하여 전정 기능검사, 동적자세검사 등의 객관적 검사의 어려움이 있기 때문에 정확한 평가 및 원인에 대한 연구는 부족한 실정이다.

전정재활치료(vestibular rehabilitation therapy, VRT)는 Cawthorne [6]과 Cooksey [7]에 의해 어지럼과 불균형 증상을 보이는 환자에게 처음 시도된 이후 지금까지 그 치료 효과가 입증되어 말초 전정질환부터 중추성 어지럼 및 심인성 어지럼 등 다양한 어지럼 환자들에게 사용되고 있다. VRT는 전정안반사(vestibulo-ocular reflex, VOR)를 강화하는 적응/주시 운동(adaptation/gaze stability exercises), 동작 감수성을 높이기 위한 습관화 운동(habituation exercises), 주시 안정성을 보장하기 위해 전정안구반사를 제외한 시각, 고유 감각 등을 사용하도록 훈련하는 대체 운동(substitution exercises)으로 구성된다.

두부외상 후 어지럼 및 불균형을 호소하는 환자들에서도 다양한 전정 재활을 통해 전정 보상을 촉진하고, 주시 안정성을 확보할 수 있다는 보고들이 있지만 대부분 증례 보고 또는 후향적 연구이며, 무작위 대조연구는 극히 적다. 본 종설은 외상성두부손상 후 어지럼에서 전정 재활의 효과에 대하여 문헌을 고찰하고 전정 재활 치료의 적용 가능성에 대하여 살펴보고자 한다.

외상성두부손상에서 전정계의 영향 (Vestibular Consequence in Traumatic Head Injury)

외상성두부손상 중 측두골 골절 및 둔상은 짧은 시간에 다양한 성분의 에너지가 직접 측두부로 강하게 전달되면서 발생한다. 경미한 두부외상이라고 하더라도 뇌에서는 신경 대사의 변화(neurometabolic changes)가 발생하며, 항상성을 다시 회복하기까지 수 주가 소요된다[8]. 두부외상의 급성기에는 일시적으로 대뇌의 혈액 순환이 급격하게

저하될 뿐 아니라, 당 대사의 증가도 동반되는 것으로 알려져 있다[8]. 항상성의 회복을 위해 많은 에너지를 필요로 하는 대사 항진 상태는 약 24시간 정도 지속되며, 이후 약 1달까지 당 대사의 저하가 동반된다[8]. 운동 및 신체 활동 등은 신체 내 에너지 대사 활성 산소의 발생을 증가시키므로, 증상의 지속 시간이 증가하고 추가 손상에 대한 위험 또한 증가하게 된다[9,10].

두부외상 후 나타나는 어지럼 및 불균형 증상의 원인은 뇌실질 중 백질(white matter)의 이상, 대뇌 및 소뇌의 미만성축삭손상(diffuse axonal injury), 미세출혈(microhemorrhage) 등의 요인들에 의해 복합적으로 발생된다는 중추성전정기능이상(central vestibular dysfunction)과 반고리관, 이석 기관 등이 영향을 받아 전정안반사의 감소로 발생하는 말초전정기능이상(peripheral vestibular dysfunction)으로 나눌 수 있다[11-13]. 중추성전정기능 이상으로 인한 어지럼의 경우 부정확한 신속안구운동(saccadic dysmetria), 편류현상(post-saccadic drift), 주시 유발 안진(gaze-evoked nystagmus) 등 비정상적인 안구운동을 관찰함으로써 진단할 수 있고, 시 고정 억제 여부를 통해 두정엽, 측두엽 및 소뇌 병변을 추정, 판단할 수 있다. 외상성두부손상으로 인해 손상 받는 말초전정계는 반고리관(semicircular canals) 및 이석 기관(otolith organ)으로 온도안진검사, 비디오두부충동검사, 회전자검사 등의 전정안반사를 볼 수 있는 검사들을 통해 말초전정기능을 평가할 수 있다. 어지럼을 호소하는 두부외상 환자들의 온도유발안진검사상 이상 소견을 보이는 경우는 6%~51%로 다양하며[12,14,15], 두부손상의 정도와 반고리관 마비 지수의 관계에 대해서는 논란이 있다[14,16]. Scherer 등[12]은 두부충동검사 시 약 42%의 환자에서 vestibulo-ocular reflex (VOR) 이득 감소(<0.7)가 있었다고 보고하였고, Balaban 등[17]은 대조군에 비해 수평 반고리관의 VOR 이득이 유의하게 감소하였음을 보고하였다. 이석 기관이 두부외상으로 받는 영향에 대한 연구는 적으나 주로 경부 전정유발근전위검사(cervical vestibular-evoked myogenic potentials, cVEMP)를 이용하며, 약 25%~32%의 환자들에서 비정상 소견이 관찰된다고 보고되었고[12,15], 반고리관의 기능 저하보다 더 많은 비율에서 이석 기관의 기능이 저하는 경우도 있어 어지럼이 있는 두부외상 환자들의 전정기능평가에 구형낭 및 전정척수반사로의 기능을 cVEMP 검사를 포함하는 것도 도움이 될 수 있다.

외상성두부외상 환자들에서의 전정 재활 (Vestibular Rehabilitation in Traumatic Brain Injury)

1. 증상의 평가 도구

외상성두부손상 환자들에게 전정 증상의 평가는 전정 재활의 종류 및 효과를 예측하는데 필수적이며, 어지럼 환자들에게 널리 쓰이고 있는 Dizziness Handicap Inventory (DHI), Activities-specific Balance Confidence Scale (ABC) 외에도 Post-Concussion Symptom Scale (PCSS), Visual Vertigo Analogue Scale (VVAS)와 같은 자기 기입식 설문들을 이용할 수 있다.

DHI는 25문항으로 구성되어 있으며, 문항들은 신체적(physical), 감정적(emotional), 기능적(functional)인 요소들을 평가할 수 있도록 구분되어 있다. 각 문항당 어지럼의 빈도에 따라 0점(없다), 2점(가끔), 4점(항상)의 점수로 환산하여 피설문자가 느끼는 어지럼의 정도를 수치화하여 평가할 수 있다.

ABC는 일상 생활 속에서 흔히 경험하게 되는 신체동작들을 보다 구체적으로 기술하여 16개 문항, 11단계 척도(0%-100%)로 구성되어 있으며, 피설문자는 문항에 대한 자신감을 백분율로 응답하게 된다. 전혀 수행할 수 없음(0%)부터 완벽히 수행할 수 있음(100%)까지 답할 수 있으며, 주로 노령층을 대상으로 낙상에 대한 두려움을 측정하기 위해 개발되었다. 하지만 선행 연구들에서 외상성두부외상으로 인한 전정증상을 호소하는 환자들 및 전정 장애 환자들에게도 유용하게 쓰일 수 있음을 보고하였다[18,19].

PCSS는 22개의 문항으로 구성되어 있으며, 22개의 다른 증상들(headache, nausea, vomiting, balance problems, dizziness, fatigue, trouble falling asleep, sleeping more than usual, sleeping less than usual, drowsiness, sensitivity to light, sensitivity to noise, irritability, sadness, nervousness, feeling more emotional, numbness or tingling, feeling slowed down, feeling mentally "foggy," difficulty concentrating, difficulty remembering, visual problems)을 0-6점 척도로 구분하여 응답할 수 있게 개발되었다.

이외에도 두부외상으로 인한 진탕 후 증상을 평가할 수 있는 설문 도구들은 The Rivermead Postconcussion Symptoms Questionnaire (RPQ), The British Columbia Postconcussion Symptom Inventory-Short Form, The Postconcussion

Syndrome Symptom Scale, The Postconcussion Syndrome Checklist, Postconcussive Symptom Questionnaire, Head Injury Scale, The New Swedish Post-Concussion Symptoms Questionnaire 등이 있으나 한국어로 번역되어 사용되고 있는 평가 도구는 거의 없는 실정이다.

VVAS는 9개의 문항으로 구성되어 있으며, 어지럼, 현훈, 불균형, 관련된 자율신경계 증상들에 대한 빈도, 증상 정도를 0-10점까지 응답할 수 있도록 개발되었으며, 전정 기능 저하, 양성체위성발작성현훈, 지속적 체위-지각 어지럼 환자들에게 적용하여 유효성이 보고되었다[20-22].

2. 전정 재활 방법 및 고려 사항

외상성두부손상 환자들에게 나타나는 어지럼, 현훈과 같은 전정 증상은 뇌의 정상 대사 기능들이 회복되고 난 후에도 지속되는 경우가 많으므로, 조기 전정기능의 평가는 뇌의 대사 기능의 변화로 인한 어지럼인지, 전정 기능저하로 인한 것인지 구분하는데 도움이 된다. 또한 편두통, 경추 기능 저하, 시각-인지 기능 저하, 자율신경계 이상 등도 동반되어 있는지 감별하여 전정 재활 치료에 대한 계획을 세우는 것이 중요하다. 하지만 아직까지 외상성두부손상에 대한 전정 재활 방법에 대해서는 아직 정립되지 못한 실정이다.

전정 재활에서 가장 주된 치료의 목적 중 하나는 동적주시 안정(dynamic gaze stability)의 회복이다. 외상성두부손상 이후 나타나는 전정안반사의 이상은 미로 진탕, 전정신경 절단, 내림프낭의 수종, 또는 외림프 누공에서 나타날 수 있고, 또한 뇌간, 소뇌와 연결되는 중추 전정의 이상이 있을 때도 보인다[23,24]. 이는 능동적인 두부 회전 동안 전운동 피질(premotor cortex)에서 유래하는 원심성 복제 신호(efferent copy signals)의 기능에 이상이 생김으로써 동적주시 불안정을 일으킬 수 있다고 보고되었다[24].

보상이 일어나지 않은 전정안반사는 다양한 방향으로 머리를 움직여 시행하는 적응/주시 운동을 통해 망막상유동 현상을 인위적으로 발생시켜 강화할 수 있다. 처음에는 목표물을 1개만 설정하여 단일 방향으로 머리를 움직이는 연습을 통해 시작하고, 점점 목표물의 수와 움직임의 축을 추가하거나 속도를 늘려나가면 환자가 일상생활에서 접할 수 있는 여러 상황에 적응이 될 수 있다. 최근에는 비동기식(asynchronous) 두부/목표물 운동이 말초전정질환에 더욱 유용하다는 보고가 있으나 두부외상 환자들에서의 동적

주시 안정에 대한 효과가 있는지는 미지수이다[25]. 또한 동적 주시 안정을 위한 운동은 정적 주시 안정을 악화시킬 수도 있을 것이다. 오랫동안 적응/주시 운동에도 불구하고 전정 증상을 호소하는 것은 정적 주시 안정이 되지 않고 있다고 판단할 수 있으며, 정도의 복시, 안구 불편감, 안구 피로 등은 정적 주시 안정의 이상을 의심할 수 있는 증상들이다[26].

외상성두부손상 환자들에게 시행되는 전정 재활 중 고려해야 할 두번째 사항은 자세 조절(postural control) 능력의 회복이다. 정상적으로 자세의 유지는 시각, 전정계, 체성감각계의 통합으로 이루어지지만, 외상성두부손상 후에는 주변 환경 조건에 따라 뇌가 구심성 정보를 다르게 인식하기 때문에 이러한 3가지 균형 시스템 간의 상호 작용의 이상이 발생한다[27]. 흥미로운 점은 외상성두부손상 환자들에게 균형 평가를 할 때 눈을 감은 상태에서보다 눈을 뜬 상태에서 균형 잡기 어려워하는 모습을 보이는데 이는 환경을 인식하고 중추 신경계에서 막대한 양의 시각 정보를 처리하는 능력이 저하되었다고 볼 수 있다[26].

자세 불안정을 치료하기 위해서는 먼저 환자의 기본적인 생활 환경과 같은 안정된 환경에서 치료를 시작하고, 점점 자극을 증가시켜야 한다. 또한 지각조절검사와 같이 안구 개폐, 바닥 상태의 변화, 기울임 등의 자극과 더불어 두부 회전, 물건 옮기기 등의 다양한 조건 아래에서 훈련을 반복하는 것은 전정 척수 반사를 강화하여 자세 유지 시스템의 통합을 촉진하게 되고 균형 유지에 대한 두려움을 경감시킬 수 있다.

3. 전정 재활의 효과

외상성두부손상 환자들에게 시행되는 전정 재활 운동의 효과에 대한 보고들은 최근 많아지고 있으나, 두부손상의 정도, 시행된 전정 재활의 종류, 치료 기간 및 간격, 효과 판정을 위한 기준이 다양하기 때문에 결과에 대한 직접적인 비교는 어렵다[28-30].

지금까지 보고된 연구들에서 외상성두부손상 환자들에게 시행한 전정 재활의 빈도 및 횟수는 1주에 1-2회[31,32], 6주에 4회[33] 등으로 연구들 간의 차이가 있었으며, 개인별 맞춤 또는 그룹형 치료 등 다양하였다. 또한 동반 손상에 대한 물리치료, 작업치료, 인지 상담, 약물치료의 여부, 횟수 및 기간 차이도 다양하였다[30,32-36]. 전정 재활 훈련의 종류는 대부분의 연구들에서 습관화 운동을 가장 많이

시행하였고, Ponsford 등[37]과 Alsalaheen [38] 등의 연구에서는 전정안반사의 향상을 위한 적응 운동을 함께 시행하였다.

두부외상 환자들에게 전정 재활의 효과는 주관적 어지럼에 대한 설문 점수 합산, 설문 및 동적자세검사를 통한 균형 점수, 보행에 대한 평가, 직장으로의 복귀 및 운동 복귀가 가능한 시점 등을 기준으로 판정하며 각각의 자가 설문 종류 및 객관적 검사들은 일반적인 전정 재활의 평가 도구와 같다.

Schneider 등[31]은 스포츠와 관련된 외상성두부손상 환자 31명을 대상으로 손상 부위에 대한 물리치료와 주 1회의 전정 재활 치료를 시행하였고 운동에 복귀할 수 있을 때까지 8주 이상의 기간 동안 가정 운동 프로그램을 병행하였다[31]. 그 결과 전정 재활을 병행한 치료군에서 2달 안에 훈련에 복귀할 수 있는 비율의 유의한 차이가 있었음을 보고하였다.

Hoffer 등[39]은 군대 내에서 발생한 135명의 두부외상 환자들을 대상으로 맞춤형 전정 재활 치료와 약물 치료를 병행하였으며, 군별 업무 복귀 시기를 비교하였다. 외상 시부터 업무 복귀까지의 시간은 외상 후 공간정위상실(post-traumatic spatial disorientation)군에서 가장 오래 걸렸으며(3개월 이상), 외상후편두통성어지럼(posttraumatic migraine-associated dizziness)군, 외상후운동유발어지럼(posttraumatic exercise-induced dizziness)군의 경우 약 1개월이 소요되었다고 보고하였다. 하지만 이 연구는 모든 환자에게 맞춤형 전정 재활을 시도한 것에서는 의의가 있으나, 전정 재활의 결과를 판단하기 위한 여러 설문 도구 및 객관적 검사들을 비교하지 못하여 효과 판정에 대한 타당성이 부족하였다.

Kleffélgaard 등[40]은 65명의 경도-중등도 외상성두부손상 환자들을 대상으로 8주간의 그룹형 전정 재활 치료의 효과 비교를 위해 무작위 대조 연구를 시행하였다. 2달 간격으로 2회의 추적 관찰 동안 각 설문 점수(Balance Error Scoring System; Dizziness Handicap Inventory; Hospital Anxiety and Depression Scale; High-level Mobility Assessment Tool for traumatic brain injury, HiMAT; Rivermead Post-Concussion Symptoms Questionnaire; RPQ Physiological subscale; RPQ Psychological subscale; VSS anxiety subscale; Vertigo Symptom Scale)를 이용하여 효과를 비교하였으며, 전정 재활 치료를 받은 군에서 치료 후 첫 번째 내원(초진으로부터 2.7±0.8개월 경과) 시의 DHl, HiMAT 점수는 대조군에 비해 유의한 차이를 보였으나, 두 번째 내원(초진으로부터 4.4±

1.0개월 경과) 시의 모든 점수는 통계적 유의성을 보이지 않았음을 보고하였다[40]. 즉, 저자들은 외상성두부손상 환자들에게 전정 재활 치료는 치료 후 단기간에 어지럼 및 불균형 증상 회복의 속도는 높여줄 수 있었지만, 장기적인 효과 판단을 위해서는 전정 재활치료의 횟수 및 기간을 증가시켜 연구 해볼 필요가 있다고 보고하였다. 그 이유는 외상성두부손상 환자들은 동반 손상에 대한 치료 기간이 다양하므로 필요한 전정 재활 치료의 기간이 오래 걸리는 경우가 많고 및 증상의 회복 기간이 다양하기 때문에 6개월 또는 1년 이상의 장기적 추적 관찰을 통해 비교하는 연구가 필요하다고 볼 수 있다.

대부분의 외상성두부손상 환자들은 신체적인 증상뿐 아니라, 불안, 우울과 같은 정신적 증상 및 일시적인 기억력 저하 또는 상실, 시간 및 공간에 대한 인지 기능의 이상 등 다양한 외상 후 증상들을 호소한다. 이와 같은 복합적인 요인들은 어지럼을 비롯한 전정 증상들에 영향을 줄 수 있으며, 전체적인 신체기능 회복에 영향을 줄 수 있는 요인이 된다. 그러므로 외상성두부손상 환자들이 호소하는 어지럼 및 불균형 증상들에 대한 치료 계획을 세우는 과정에서 전정 재활 치료와 함께 동반 손상에 대한 정밀한 평가 및 치료 계획 수립, 정신적 지지 및 인지 치료까지도 고려하는 것이 전정 재활 치료의 효과를 높일 수 있을 것이다.

결 론

어지럼을 호소하는 외상성두부손상 환자들에게서 동반 손상의 치료와 더불어 전정 재활 치료를 시행하는 것은 유용할 것으로 기대되나 이에 대한 근거 수준이 높은 연구는 많지 않다. 따라서 전정 재활치료의 유용성을 입증하기 위한 무작위대조연구가 필요하며, 특히, 맞춤형 전정 재활치료에 대한 연구도 필요할 것으로 생각한다.

중심 단어: 전정, 어지럼, 재활, 손상, 두부

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자들은 이 논문과 관련하여 이해관계의 충돌이 없음을 명시합니다.

REFERENCES

1. Hoffer ME, Balaban C, Gottshall K, Balough BJ, Maddox MR, Penta JR. Blast exposure: vestibular consequences and associated characteristics. *Otol Neurotol* 2010;31:232-6.
2. Maskell F, Chiarelli P, Isles R. Dizziness after traumatic brain injury: overview and measurement in the clinical setting. *Brain Inj* 2006;20:293-305.
3. Akin FW, Mumane OD, Hall CD, Riska KM. Vestibular consequences of mild traumatic brain injury and blast exposure: a review. *Brain Inj* 2017;31:1188-94.
4. Arshad Q, Roberts RE, Ahmad H, Lobo R, Patel M, Ham T, et al. Patients with chronic dizziness following traumatic head injury typically have multiple diagnoses involving combined peripheral and central vestibular dysfunction. *Clin Neurol Neurosurg* 2017;155:17-9.
5. Dikmen S, Machamer J, Fann JR, Temkin NR. Rates of symptom reporting following traumatic brain injury. *J Int Neuropsychol Soc* 2010;16:401-11.
6. Cawthorne TC. The physiological basis for head exercises. *J Chart Soc Physiother* 1944;30:106-7.
7. Cooksey FS. Rehabilitation in vestibular injuries. *Proc R Soc Med* 1946;39:273-8.
8. Giza CC, Hovda DA. The new neurometabolic cascade of concussion. *Neurosurgery* 2014;75 Suppl 4:S24-33.
9. Barkhoudarian G, Hovda DA, Giza CC. The molecular pathophysiology of concussive brain injury. *Clin Sports Med* 2011;30:33-48.
10. Blake DM, Tomovic S, Jyung RW. Temporal bone fracture. *Ear Nose Throat J* 2014;93:16-25.
11. Gattu R, Akin FW, Cacace AT, Hall CD, Mumane OD, Haacke EM. Vestibular, balance, microvascular and white matter neuroimaging characteristics of blast injuries and mild traumatic brain injury: Four case reports. *Brain Inj* 2016;30:1501-14.
12. Scherer MR, Burrows H, Pinto R, Littlefield P, French LM, Tarbett AK, et al. Evidence of central and peripheral vestibular pathology in blast-related traumatic brain injury. *Otol Neurotol* 2011;32:571-80.
13. Brahm KD, Wilgenburg HM, Kirby J, Ingalla S, Chang CY, Goodrich GL. Visual impairment and dysfunction in combat-injured servicemembers with traumatic brain injury. *Optom Vis Sci* 2009;86:817-25.
14. Ernst A, Basta D, Seidl RO, Todt I, Scherer H, Clarke A. Management of posttraumatic vertigo. *Otolaryngol Head Neck Surg* 2005;132:554-8.
15. Akin FW, Mumane OD, Hall CD, Riska KM. Vestibular consequences of mild traumatic brain injury and blast exposure: a review. *Brain Inj* 2017;31:1188-94.
16. Berman JM, Fredrickson JM. Vertigo after head injury--a five year follow-up. *J Otolaryngol* 1978;7:237-45.
17. Balaban C, Hoffer ME, Szczupak M, Snapp H, Crawford J, Murphy S, et al. Oculomotor, vestibular, and reaction time tests in mild traumatic brain injury. *PLoS One* 2016;11:e0162168.
18. Whitney SL, Hudak MT, Marchetti GF. The activities-specific

- balance confidence scale and the dizziness handicap inventory: a comparison. *J Vestib Res* 1999;9:253-9.
19. **Lajoie Y, Girard A, Guay M.** Comparison of the reaction time, the Berg Scale and the ABC in non-fallers and fallers. *Arch Gerontol Geriatr* 2002;35:215-25.
20. **Grigol TA, Silva AM, Ferreira MM, Manso A, Ganança MM, Caovilla HH.** Dizziness handicap inventory and visual vertigo analog scale in vestibular dysfunction. *Int Arch Otorhinolaryngol* 2016;20:241-3.
21. **Toupet M, Ferrary E, Grayeli AB.** Visual analog scale to assess vertigo and dizziness after repositioning maneuvers for benign paroxysmal positional vertigo. *J Vestib Res* 2011;21:235-41.
22. **Dannenbaum E, Chilingaryan G, Fung J.** Visual vertigo analogue scale: an assessment questionnaire for visual vertigo. *J Vestib Res* 2011;21:153-9.
23. **Davies RA, Luxon LM.** Dizziness following head injury: a neuro-otological study. *J Neurol* 1995;242:222-30.
24. **Scherer MR, Shelhamer MJ, Schubert MC.** Characterizing high-velocity angular vestibulo-ocular reflex function in service members post-blast exposure. *Exp Brain Res* 2011;208:399-410.
25. **Schubert MC, Della Santina CC, Shelhamer M.** Incremental angular vestibulo-ocular reflex adaptation to active head rotation. *Exp Brain Res* 2008;191:435-46.
26. **Gurley JM, Hujsak BD, Kelly JL.** Vestibular rehabilitation following mild traumatic brain injury. *NeuroRehabilitation* 2013;32:519-28.
27. **Mahboobin A, Loughlin PJ, Redfern MS, Sparto PJ.** Sensory re-weighting in human postural control during moving-scene perturbations. *Exp Brain Res* 2005;167:260-7.
28. **Shepard NT, Telian SA, Smith-Wheelock M, Raj A.** Vestibular and balance rehabilitation therapy. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 1993;102(3 Pt 1):198-205.
29. **Basta D, Singbartl F, Todt I, Clarke A, Ernst A.** Vestibular rehabilitation by auditory feedback in otolith disorders. *Gait Posture* 2008;28:397-404.
30. **Alsalaheen BA, Mucha A, Morris LO, Whitney SL, Furman JM, Camiolo-Reddy CE, et al.** Vestibular rehabilitation for dizziness and balance disorders after concussion. *J Neurol Phys Ther* 2010;34:87-93.
31. **Schneider KJ, Meeuwisse WH, Nettel-Aguirre A, Barlow K, Boyd L, Kang J, et al.** Cervicovestibular rehabilitation in sport-related concussion: a randomised controlled trial. *Br J Sports Med* 2014;48:1294-8.
32. **Donaldson CJ, Hoffer ME, Balough BJ, Gottshall KR.** Prognostic assessments of medical therapy and vestibular testing in post-traumatic migraine-associated dizziness patients. *Otolaryngol Head Neck Surg* 2010;143:820-5.
33. **Faltus J.** Rehabilitation strategies addressing neurocognitive and balance deficits following a concussion in a female snow-board athlete: a case report. *Int J Sports Phys Ther* 2014;9:232-41.
34. **Gottshall KR, Hoffer ME.** Tracking recovery of vestibular function in individuals with blast-induced head trauma using vestibular-visual-cognitive interaction tests. *J Neurol Phys Ther* 2010;34:94-7.
35. **Gurr B, Moffat N.** Psychological consequences of vertigo and the effectiveness of vestibular rehabilitation for brain injury patients. *Brain Inj* 2001;15:387-400.
36. **Gottshall K, Gray N, Drake AI.** A unique collaboration of female medical providers within the United States Armed Forces: rehabilitation of a marine with post-concussive vestibulopathy. *Work* 2005;24:381-6.
37. **Ponsford J, Willmott C, Rothwell A, Cameron P, Kelly AM, Nelms R, et al.** Factors influencing outcome following mild traumatic brain injury in adults. *J Int Neuropsychol Soc* 2000;6:568-79.
38. **Alsalaheen BA, Whitney SL, Mucha A, Morris LO, Furman JM, Sparto PJ.** Exercise prescription patterns in patients treated with vestibular rehabilitation after concussion. *Physiother Res Int* 2013;18:100-8.
39. **Hoffer ME, Gottshall KR, Moore R, Balough BJ, Wester D.** Characterizing and treating dizziness after mild head trauma. *Otol Neurotol* 2004;25:135-8.
40. **Kleffelgaard I, Soberg HL, Tamber AL, Bruusgaard KA, Pripp AH, Sandhaug M, et al.** The effects of vestibular rehabilitation on dizziness and balance problems in patients after traumatic brain injury: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil* 2019;33:74-84.