

고유감각이 저하된 불완전 척수손상 환자에서 로봇보조 보행치료의 효과: 증례보고

유지현¹ · 임길병¹ · 김지용¹ · 조성일² · 이상완¹

¹인제대학교 일산백병원 재활의학과 및 ²재활치료실

Effects of Robot-Assisted Gait Training in Spinal Cord Injury Patient with Impaired Proprioception: A Case Report

Jeehyun Yoo, M.D., Ph.D.¹, Kil-Byung Lim, M.D., Ph.D.¹, Jiyong Kim, M.D., Ph.D.¹, Sung Il Cho, M.S.² and Sang Wan Lee, M.D.¹

¹Department of Physical Medicine and Rehabilitation and ²Rehabilitation Center, Ilsan Paik Hospital, Inje University, Goyang 10380, Korea

Abstract

Spinal cord injury (SCI) commonly impairs proprioception and tactile sensation, significantly affecting incomplete SCI patient's walking ability. Robot-assisted gait training (RAGT) is an alternative treatment method of conventional overground gait training. It provides repetitive, interactive, intensive and task-specific practice that may help improve the walking ability of patients by accelerating neuroplasticity. We report a case of a 76-year-old patient with damage to the dorsal column of the spinal cord during neurosurgery. Although conventional physiotherapy was performed five months after injury, he could not ambulate with a walker because of persistently impaired proprioception. After the patient was received 19 sessions of RAGT using the Morning Walk[®], the patient's proprioception showed improvement, allowing the patient to independently ambulate with a walker. This case shows that for SCI patients with reduced proprioception, the end-effector type RAGT using the Morning Walk[®] improves proprioception and their functional level about walking ability.

Key Words

Proprioception, Robotics, Spinal cord injuries

접수일 : 2021년 9월 1일
 게재 승인일 : 2021년 10월 14일
 교신저자 : 이상완
 주소 : 경기도 고양시 일산서구 주화로
 170, 인제대학교 일산백병원
 재활의학과
 Tel : 82 31 910 7440
 Fax : 82 31 910 7446
 e-mail : i9795@paik.ac.kr

서론

외상이나 비외상성 원인으로 인해 척수손상이 발생하면 환자는 손상 부위 이하로 다양한 정도의 운동 및 감각신경 마비를 경험하게 된다. 척수 내에는 팔이나 다리에서 들어온 감각 신호를 뇌로 전달하는 상행신경로와 뇌에서 팔이나 다리

로 내려가는 운동 신호를 전달하는 하행신경로가 존재한다. 가벼운 촉각, 고유감각 및 진동감각을 전달하는 척수의 등측에 위치한 후주-내측섬유대로와, 통증 및 온도감각을 전달하는 척수의 배측에 위치한 척수시상로가 상행신경로에 해당한다. 척수의 외측 및 앞측에 위치한 외측 피질척수로와 전피질척수로는 하행신경로에 해당한다.¹ 이러한 상행 및 하행신

경로의 해부학적 위치로 인해 척수손상의 발생 정도, 외력 및 압력이 가해진 방향 등에 따라 환자에게 나타나는 운동마비 및 감각마비의 양상이 달라질 수 있다.

직립 보행은 이동을 위해 수행하는 사람의 기본적인 특이한 움직임으로, 정상적인 보행을 위해서는 근력 외에도 시력, 관절의 고유감각, 인지능력 등의 뒷받침이 필요하다. 고유감각은 시각적 되먹임이 없어도 관절의 위치와 움직임에 대한 감각을 느낄 수 있는 능력으로, 사람이 의식하지 않아도 인지할 수 있는 감각이다. 고유감각에 의한 되먹임은 신경학적 이상이 없는 사람의 운동 조절을 위해서도 필수적이지만, 척수손상 환자의 보행 능력 회복에 있어서도 중요한 역할을 한다.²

많은 연구들에서 로봇 보행치료를 고식적 재활치료와 비교하였을 때 보행 능력 향상에 더 큰 효과가 있지는 않으나 기존의 재활치료를 대체할 수 있는 치료 방법으로 제시하고 있다.³ 하지 재활로봇을 이용한 로봇 보행치료는 집중적이고 반복적인 과제 지향적 훈련을 통해 신경가소성을 촉진하여 척수손상 환자의 손상된 감각과 운동기능을 회복시켜 보행 능력 향상을 가져온다.⁴ 이는 구조적인 형태에 따라 외골격형(exoskeletal type)과 발판 구동형(end-effector type)의 두 가지로 나눌 수 있다. 발판 구동형 하지 재활로봇은 발판을 사용하여 하지의 움직임을 야기하고 외골격형 하지 재활로봇에 비해 원위부 관절에 더 큰 역동학적 움직임을 가져온다.³ 이는 환자에게 반복적이고 규칙적인 감각 자극을 제공하고 되먹임

기작을 활성화하여 균형 능력의 호전을 가져온다.

척수 후주부에 손상을 받은 본 증례의 환자는 하지의 불안전 마비와 함께 고유감각 기능의 저하를 호소하였다. 환자는 고식적 재활치료를 5개월 동안 시행 받으며 하지 근력은 호전되었으나 고유감각 기능의 호전 및 보행 기능의 회복은 관찰되지 않았다. 이후 발판 구동형 하지 재활로봇을 이용한 로봇 보행치료를 시행하면서 고유감각 기능 회복과 동시에 보행 기능의 회복을 경험하여 그 증례를 보고하고자 한다.

증례

독립적 보행이 가능한 76세 남자 환자가 요통을 주소로 본원 신경외과에 입원하였다. 요추 수술 실패 증후군 진단하에 2019년 4월 흉추 9-10번 위치에 척수자극기 삽입술을 시행하였으나 수술 후 환자가 양측 하지 감각 및 근력저하를 호소하여 삽입한 척수자극기를 제거하였다. 수술 후 촬영한 흉요추 자기공명영상검사의 T2 강조 영상에서 흉추 8-10 부위에 고신호 강도가 관찰되었다(Fig. 1). 환자는 수술 이틀 후 재활의학과에 신경학적 상태 확인 및 재활치료 시행을 위해 협진 의뢰되었다. 당시 시행한 척수손상의 신경학적 분류를 위한 국제표준기준(International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury, ISNCSCI) 평가 중 감

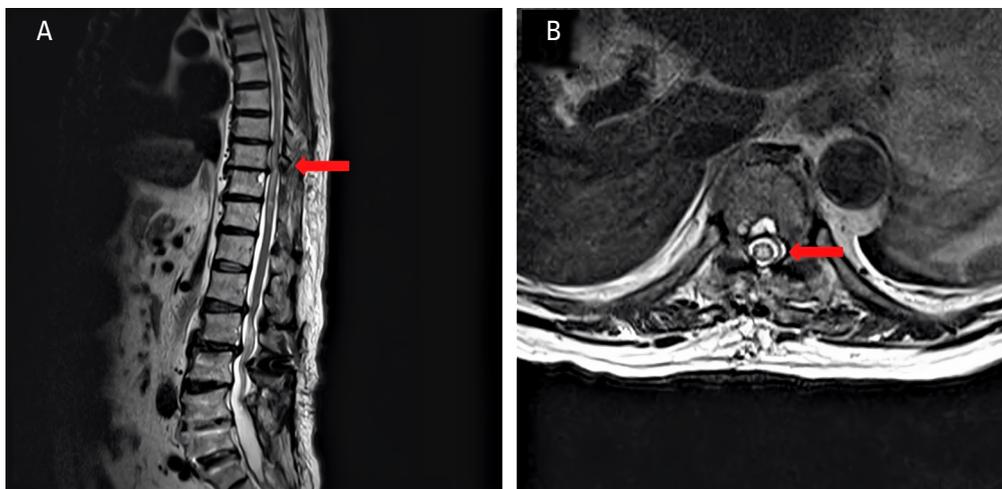


Fig. 1. TL-spine magnetic resonance imaging (MRI) scan. Sagittal T2-weighted image (A) and axial T2-weighted image (B). MRI scan showed an abnormal high signal intensity in the T8-10 spinal cord (arrow).

각평가인 가벼운 촉각(light touch)와 통각(pinprick) 검사에서는 이상 소견을 보이지 않았다. 환자의 병력을 고려할 때 후주-내측섬유대로의 손상이 의심되었기 때문에 가벼운 촉각 저하의 가능성이 있었으나 실제 ISNCSCI 평가에서는 가벼운 촉각은 정상으로 평가되었다.

환자의 고유감각 평가를 위해 ISNCSCI의 선택감각평가인 관절움직임 및 위치감각검사(joint movement appreciation and position sense)을 환자의 양측 무릎과 발목 그리고 엄지 발가락에서 시행하였다. ISNCSCI의 관절움직임 및 위치감각 검사는 검사자가 각 관절에 대해 큰 움직임과 작은 움직임(대략 10도)을 가하였을 때 환자가 관절의 움직임을 얼마나 잘 구분하는지를 측정하여 평가한다. 관절의 큰 움직임과 작은 움직임 각각에 대한 10회의 검사에서 8회 이상의 정반응이 지속적으로 모두 보일 경우 2점(normal)으로 평가하며, 관절의 큰 움직임 검사에서는 10회 중 8회 이상의 지속적인 정반응

을 보였으나 작은 움직임에서는 8회 미만의 정반응을 보일 경우 1점(impaired), 관절의 큰 움직임에서도 8회 미만의 정반응을 보인 경우에는 0점(absent)으로 평가한다.⁵ 본 환자의 고유감각검사 결과는 양측 무릎에서는 2/2로 정상이었으나, 발목과 엄지발가락은 각각 1/1, 0/0로 감각저하를 보였다(Table 1). 운동평가에서는 L2 중심근육(key muscle)인 양측 고관절 굴곡근과 L3 중심근육인 무릎 신전근이 2등급(poor)으로 평가되었으며, L4-S1의 중심근육들은 3등급(fair)으로 평가되었다(Table 2). 미국 척수손상협회 장애척도(American Spinal Injury Association Impairment Scale)는 D로 평가되었다.

버그 균형 점수는 6점이었으며, 척수손상 환자의 보행 기능을 평가하는 Walking Index in Spinal Cord Injury II (WISCI-II)는 0단계로 기립자세 유지나 보행이 불가능한 상태였다. 또한 척수 환자의 일상생활 동작을 평가하는 척수독립성지수(Spinal Cord Independence Measurement-III) 중

Table 1. Sensory Changes after Conventional Physiotherapy and Robot-Assisted Gait Training

Sensory	Baseline	After 1 month CP	After 5 months CP	After 8 th times RAGT	After 19 th times RAGT
Proprioception	Ankle 1/1, 1 st toe 0/0	Ankle 1/1, 1 st toe 0/0	Ankle 1/1, 1 st toe 0/0	Ankle 2/2, 1 st toe 0/0	Ankle 2/2, 1 st toe 1/1
Pinprick	INT/INT	INT/INT	INT/INT	INT/INT	INT/INT
Light touch	INT/INT	INT/INT	INT/INT	INT/INT	INT/INT

CP: Conventional Physiotherapy, RAGT: Robot-Assisted Gait Training, INT: Intact

Table 2. Muscle Strength Changes after Conventional Physiotherapy and Robot-Assisted Gait Training

Key muscle	Baseline	After 1 month CP	After 5 months CP	After 8 th times RAGT	After 19 th times RAGT
L2	2/2	3/3	3/3	4/4	4/4
L3	2/2	4/4	4/4	4/4	4/4
L4	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4
L5	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4
S1	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4

CP: Conventional Physiotherapy, RAGT: Robot-Assisted Gait Training

이동 항목에 대한 점수는 40점 만점 중 6점으로 평가되었다 (Table 3).

이후 환자의 근력, 고유감각 및 기능적 수준의 회복을 위해 근력운동, 균형훈련, 감각훈련 및 보행훈련 등의 고식적 재활 치료를 하루 1시간씩 주 5회 시행하였다.

한 달 간의 고식적 재활치료를 시행한 후 2019년 5월 ISNCSCI 재평가를 시행하였다. 그 결과, 하지의 모든 중심근육에서 근력이 향상되어, 양측 L2는 3등급, L3-S1은 4등급 (good)으로 호전되었다(Table 2). 이에 비해 고유감각은 발목과 엄지발가락에서 1/1, 0/0으로 재활치료 시행 전과 동일하였다(Table 1). 고유감각의 호전은 없으나 근력이 호전됨에 따라 환자의 보행 수준도 호전을 보여 전방위커를 잡고 치료사의 최대 도움하에 4-5 m 보행이 가능하였다.

그러나 보행 시 보폭(step length)과 보행 너비(step width)가 일정하지 않고 발의 위치를 눈으로 확인하며 걷는 양상이 관찰되었는데, 이는 당시 환자의 앉은 자세에서의 동적 균형 능력이 정상이었다는 점과 보행운동지수(Ambulatory Motor Index)가 30점 만점에 24점으로 환자의 하지 근력이 보조기 없이도 보행 가능한 수준임을 고려하였을 때, 체간의 균형 저하나 하지 근력저하 때문이 아닌 고유감각의 저하에 의한 증상으로 판단되었다. 전방위커를 잡고 치료사의 최대 도움하에 4-5m 보행이 가능하였기 때문에 WISCI-II는 1단계로 평가되었으며, 버그 균형 점수는 11점으로, 척수독립성지수 중 이동 항목은 10점으로 호전되었다(Table 3).

재평가 이후 4개월 동안 고식적 재활치료를 지속하였으나, 이후에는 환자의 근력과 고유감각 호전이 관찰되지 않았다

(Table 1, 2). WISCI-II는 1단계로 동일하였으나, 버그 균형 점수는 12점, 척수독립성지수의 이동 항목은 12점으로 호전되었다(Table 3).

발병 5개월이 지난 2019년 9월, 본원 재활치료실에 발판 구동형 하지 재활로봇인 Morning Walk® (Curexo, Seoul, South Korea)가 설치되었다. Morning Walk®는 발판의 움직임을 통해 보행 궤적을 만들어내며, 외골격형 하지 재활로봇과는 달리 고관절과 무릎관절에는 자유로운 움직임을 허용한다는 장점이 있다. 또한, 환자에게 로봇 보행치료 시행을 위해 체중 지지가 필요한 경우에는 안장의 높낮이 조절을 통해 체중 지지 정도를 결정할 수 있다. 환자는 하루 30분, 주 5회 로봇보조 보행치료를 시작하였으며, 하루에 1시간씩 주 5회의 고식적 재활치료를 병행하였다.

8회의 로봇 재활치료 이후 환자의 ISNCSCI 및 기능 수준을 재평가하였다. ISNCSCI 검사 결과, 양측 L2-S1의 근력은 4등급으로 호전되었고(Table 2), 지속적인 고식적 재활치료에도 호전을 보이지 않았던 발목의 고유감각이 2/2로 호전되었다(Table 1). 환자는 전방위커를 잡은 상태에서 치료사의 중등도 지지하에 10 m 보행이 가능해져 WISCI-II 8단계로 평가되었으나, 보폭, 보행 너비는 일정하지 않고 시각적 보상이 여전히 필요하였다. 버그 균형 점수는 23점, 척수독립성지수는 15점으로 호전되었다. 보행 능력이 호전되면서 치료사의 보조하에 전방위커를 사용하여 일어서서 걷기(Timed up and go) 검사를 시행하였으며, 그 결과는 38.7초였다(Table 3). 이후 로봇보조 보행치료를 지속하였으며, 2019년 10월 총 19차례의 로봇보조 보행치료를 끝내고 ISNCSCI 및 기능 수준을 재평가

Table 3. Functional Level Changes after Conventional Physiotherapy and Robot-Assisted Gait Training

Functional level	Baseline	After 1 month CP	After 5 months CP	After 8 th times RAGT	After 19 th times RAGT
WISCI-II	0	1	1	8	13
BBS	6	11	12	23	27
SCIM-III (Mobility domain)	6	10	12	15	17
TUG	U/C	U/C	U/C	38.7 sec	35.3 sec

CP: Conventional Physiotherapy, RAGT: Robot-Assisted Gait Training, WISCI-II: Walking Index in Spinal Cord Injury II, BBS: Berg Balance Scale, SCIM-III: Spinal Cord Independence Measurement III, TUG: Timed Up and Go, U/C: Uncheckable

한 결과, 양측 L2-S1의 근력은 4등급으로 유지되었고(Table 2), 엄지발가락의 고유감각이 1/1로 호전되었다(Table 1).

고유감각의 호전과 함께 환자의 보행에 대한 기능적 수준도 호전을 보였다. 환자는 치료사의 도움 없이 독립적으로 보행기를 잡고 10 m 이상 보행이 가능하여 WISCI-II 13단계로 평가되었으며, 보폭과 보행 너비가 안정되고 시각적 보상 없이 보행이 가능해졌다. 버그 균형 점수는 27점, 척수독립성지수의 이동 항목은 17점, 일어서서 걷기 검사는 35.3초로 호전되었다(Table 3).

고찰

이 사례는 고유감각이 척수손상 환자의 보행 능력을 결정하는 중요한 요인이 될 수 있으며, 고유감각이 저하된 환자에서 발판 구동형 하지 재활로봇 치료가 고유감각 및 보행 기능을 향상시키는 데 도움이 된다는 것을 보여준다.

환자는 척수손상 당시 시행한 초기 ISNCSCI 평가에서 근력저하 및 고유감각 저하를 보였으며, 1개월간의 고식적 재활 치료 이후 양측 L2 근력은 2등급에서 3등급으로, 양측 L3의 근력은 2등급에서 4등급으로 두드러지는 근력의 호전을 보였으나 발목과 엄지발가락에서 평가한 고유감각은 각각 1/1, 0/0으로 발병 당시에 비해 호전을 보이지 않았다. 당시 보행 수준은 WISCI-II 0단계에서 1단계, 버그 균형 점수 6점에서 11점으로 소폭 호전을 보였으나, 근력 수준을 고려할 때에는 낮은 기능적 수준이었다. 이후 5개월간의 지속적인 고식적 재활치료에도 불구하고 고유감각은 호전을 보이지 않았으며 보행에 대한 기능적 수준도 유사하게 평가되었다.

본 증례의 환자는 발판 구동형 하지 재활로봇을 이용한 로봇보조 보행치료를 시행하면서 고유감각이 호전을 보이기 시작하였으며, 총 19회의 로봇보조 보행치료를 마치고 발목과 엄지발가락에서 평가한 고유감각이 각각 2/2, 1/1로 호전을 보였다. 고유감각이 회복을 보이는 것과 동시에 환자의 보행에 대한 기능적 수준인 WISCI-II도 1단계에서 13단계로 호전을 보였다. 이는 고유감각이 환자의 보행에 대한 기능적 수준과 연관성이 있으며, 발판 구동형 하지 재활로봇을 이용한 로봇보조 보행치료가 고유감각 회복에 영향을 준다는 것을 보여준다.

고유감각은 움직임을 조절하는 데 필수적인 요인으로, 근력마비가 없는 환자도 고유감각이 저하되면 힘과 관절의 움

직임을 조절하는 데 어려움을 느끼고, 자세 유지와 보행에 대한 기능적 수준의 저하가 발생한다.⁶⁻⁷ 또한 고유감각이 저하된 환자에서는 외부 자극의 존재 및 자극의 방향과 크기를 감지하기가 어려우며, 이는 신경 회복에도 영향을 끼쳐 환자의 기능적 수준의 호전 속도를 더디게 할 수 있다.⁸ 본 증례에서도 환자의 고유감각 호전이 없었던 5개월의 기간 동안에는 보행 및 균형 능력에 대한 호전도 두드러지지 않았다.

이처럼 보행에 대한 기능적 수준을 결정하는 데 고유감각이 중요한 역할을 한다는 점에서, 고유감각과 운동 조절 사이의 기능적 연관성을 이해하고 학습을 통해 신경가소성(neuroplasticity)을 촉진하여 손상된 고유감각을 회복시키는 것에 대한 관심이 증가하고 있다.⁹

로봇을 이용한 보행치료는 반복적이고 집중적이며, 특정한 작업을 수행하는 특성을 가지며, 이를 통해 신경가소성을 촉진하여 재활치료의 효과를 극대화시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁰ 발판 구동형 하지 재활로봇은 발판의 움직임을 통해 환자의 발목관절과 무릎관절, 그리고 고관절의 움직임을 야기하며, 특히 자유성이 허용되는 무릎과 고관절의 움직임은 고유감각 수용기를 자극하여 손상된 중추신경계의 신경가소성을 촉진할 수 있다.¹¹ 본 증례의 환자도 발판 구동형 하지 재활로봇을 이용한 로봇보조 보행치료가 고유감각 호전을 이끌어내면서 기능적 수준의 향상도 경험할 수 있었다.

본 사례에서, 로봇보조 보행치료 이후에 보였던 환자의 기능적 수준의 향상이 고유감각의 호전뿐만 아니라 하지 근력 및 체간 조절 능력의 호전에 의한 영향이었을 가능성도 있다. 그러나 로봇 보행치료를 시작하기 이전부터 환자의 앉은 자세에서의 동적 균형 능력이 정상이었다는 점과 로봇 보행치료 시행 이후에 양측 L2의 근력이 3등급에서 4등급으로 소폭 상승한 것을 제외하고는 나머지 하지 근육들의 근력이 로봇치료를 시행하기 전의 하지 근력과 동일하게 유지되었다는 점을 통해 고유감각의 호전이 환자의 보행에 대한 기능적 수준의 호전과 가장 큰 연관성이 있다고 볼 수 있다. 또한 자연적인 신경 회복을 기대할 수 있는 급성기부터 아급성기 동안 고식적 재활치료를 지속했음에도 불구하고 보행 기능의 호전이 더디었던 환자가 약 1개월간의 로봇 재활치료 이후 두드러지는 기능적 수준의 호전을 보였다는 점은 환자의 보행기능 향상에 발판구동형 하지 재활로봇을 이용한 로봇 보행치료가 긍정적인 영향을 주었다는 점을 시사한다.

따라서, 고유감각 저하를 보이는 척수손상 환자에게 발판 구동형 하지 재활로봇을 이용한 로봇보조 보행치료의 시행은

고유감각 호전에 도움을 줄 수 있으며, 이를 통해 환자의 보행 능력 및 균형 능력 향상도 기대할 수 있다. 근력마비 외에도 고유감각 저하가 동반된 척수손상 환자에게, 고유감각 호전을 통한 기능적 수준 향상을 위해 발판 구동형 하지 재활로봇을 이용한 로봇보조 보행치료를 시행하는 것을 고려해 볼 수 있겠다.

REFERENCES

1. Shin JC, Shin HS, Jo KH, Kim MO. Traumatic spinal cord injury. In: Shin JC, editor. Rehabilitation medicine, 1st ed, Gyeonggi-do Paju: Koonja; 2020:604-605
2. Takeoka A. Proprioception: bottom-up directive for motor recovery after spinal cord injury. *Neurosci Res* 2020;154:1-8
3. Gassert R, Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. *J Neuroeng Rehabil* 2018;15:46
4. Calabro RS, Filoni S, Billeri L, Balletta T, Cannavo A, Militi A, et al. Robotic rehabilitation in spinal cord injury: a pilot study on end-effectors and neurophysiological outcomes. *Ann Biomed Eng* 2021;49:732-745
5. Kirshblum SC, Burns SP, Biering-Sorensen F, Donovan W, Graves DE, Jha A, et al. International standards for neurological classification of spinal cord injury (revised 2011). *J Spinal Cord Med* 2011;34:535-546
6. Cuppone AV, Squeri V, Semprini M, Masia L, Konczak J. Robot-assisted proprioceptive training with added vibrotactile feedback enhances somatosensory and motor performance. *PLoS One* 2016;11:e0164511.
7. Sainburg RL, Poizner H, Ghez C. Loss of proprioception produces deficits in interjoint coordination. *J Neurophysiol* 1993;70:2136-2147
8. Casadio M, Morasso P, Sanguineti V, Giannoni P. Minimally assistive robot training for proprioception enhancement. *Exp Brain Res* 2009;194:219-231
9. Goble DJ, Anguera JA. Plastic changes in hand proprioception following force-field motor learning. *J Neurophysiol* 2010;104:1213-1215
10. Nizamis K, Athanasiou A, Almpanti S, Dimitrousis C, Astaras A. Converging robotic technologies in targeted neural rehabilitation: a review of emerging solutions and challenges. *Sensors* 2021;21:2084
11. Gandolfi M, Vale N, Dimitrova E, Zanolin ME, Mattiuz N, Battistuzzi E, et al. Robot-assisted stair climbing training on postural control and sensory integration processes in chronic post-stroke patients: a randomized controlled clinical trial. *Front Neurosci* 2019;13:1143