

Original Article

Open Access

경직형 뇌성마비 아동의 신체기능과 하지 촉각의 상관관계 연구

윤혜령^{1,2} · 예나연¹ · 이은주[†]

¹경성대학교 물리치료학과, ²양산부산대병원

The Correlation between Physical Function and Lower Limb Tactile Sense in Children with Spastic Cerebral Palsy

Hye-Lyeong Yun, P.T., M.S.^{1,2} · Na-Yeon YE, P.T., B.S.¹ · Eun-Ju Lee, P.T., Ph.D.[†]

¹Department of Physical Therapy, Kyungseong University, Republic of Korea

²Department of physical therapy, Pusan National University Yangsan Hospital, Republic of Korea

Received: July 19, 2023 / Accepted: August 13, 2023

© 2023 Journal of Korea Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

| Abstract |

Purpose: The purpose of this study was to investigate tactile sense perception of the lower extremities according to physical function in children with spastic cerebral palsy.

Methods: This study was conducted on 15 children diagnosed with spastic cerebral palsy. Physical function measurement items included dynamic balance ability, gross motor function level, and lower extremity ankle spasticity. The lower extremity tactile sensation uses a monofilament to measure the sole of the first metatarsal head, the sole of the fifth metatarsal head, the heel, the anterior part of the shin midway between the patella and the ankle joint, the kneecap, the upper anterior iliac spine, and the knee. A total of six measurements were taken in the mid-femoral region of the bone. Spearman correlation analysis was performed to determine the degree of body function and lower extremity tactile perception.

Results: As the physical function of children with spastic cerebral palsy deteriorated, there was a decrease in tactile sensation in the thigh area corresponding to the proximal lower extremity. ($p < .05$).

Conclusion: Children with spastic cerebral palsy and poor physical function have sensory loss not only in the distal part but also in the proximal part, so a treatment approach that recognizes and improves it is necessary.

Key Words: Spastic, Cerebral palsy, Physical function, Tactile sense

[†]Corresponding Author : Eun-Ju Lee (nkdreamju@hanmail.net)

I. 서론

뇌성마비는 주로 경직, 운동범위 제한, 근력약화, 협응력 결여 등 자세와 운동 발달 장애를 특징으로 하는 질환이다. 뇌성마비의 전통적인 재활 접근법은 운동 중심으로 근골격계 및 운동 장애를 개선하는데 중점을 두었으며 감각 문제에 대한 관심은 적었다. 그러나 최근의 뇌성마비 정의에서는 비정상적인 운동 조절과 더불어 감각 문제 또한 뇌성마비에게 흔히 나타날 수 있는 것으로 인정되며 중요하게 다루어지고 있다(Rosenbaum et al., 2007).

감각은 신체 내부 및 외부에서 들어오는 자극과 정보에 대해 바르게 감지하는 작용이다. 뇌에 적절한 시냅스 구성을 촉진하는 감각 입력은 신경계 발달 및 초기 운동 발달 학습에 매우 중요하며 인간이 상황에 맞게 적절하게 행동하고 움직일 수 있게 해준다. 피부 및 점막, 건 등에 분포되어 있는 감각 수용체가 자극을 받아 들여 전달하는 감각 처리 과정은 과제 수행 및 복잡한 행동 기술을 습득하기 위한 기초이다(Cascio, 2010; Dannenbaum & Dykes, 1988). 감각 처리 과정에서 결손이 일어나면 뇌에서 운동 학습, 신체 이미지 형성 및 기능적 발달이 저하될 수 있다. 감각 결손이 있는 사람들은 관련 신체 부위를 기능적으로 통합하지 못하고 제한적으로 사용하게 되어 더 큰 운동 능력의 결손을 보인다(Ayres, 1996; Umansky, 1973).

경직형 뇌성마비의 뇌 영상 연구에서는 운동장애를 야기하는 대뇌피질 척수로(corticospinal tract) 손상 뿐만 아니라 감각 장애를 시사하는 시상피질 방사(thalamocortical radiation) 손상, 체감각 피질(somatosensory cortex)의 비정상적인 활성화가 확인되었다(Burton et al., 2009; Clayton et al. 2003; Kurz et al., 2014; Papadelis et al., 2018; Rosenbaum et al., 2007). 특히, 확산 텐서 영상(DTI) 연구에서는 대뇌피질 척수로보다 시상피질로 손상에 더 심각한 손상이 관찰되어 뇌성마비의 감각 기능 문제의 심각성이 보고되었다(Hoon et al., 2009).

뇌성마비 아동의 약 50% 이상에는 운동장애 외에

촉각, 고유수용성 및 시각 장애 등의 감각 장애가 있다. 특히 경직형 뇌성마비 아동은 통증감각, 위치 감각 인식이 어려우며 하지의 신체감각 결함이 더 두드러지는 경향이 있다(Mclaughlin et al., 2005; Wingert et al., 2009). 경직형 뇌성마비의 하지 감각 기능 장애는 촉각 자극에 대한 비정상적인 피질 반응을 초래하며 뇌성마비 아동의 보행 능력과 하지 근력에 부정적인 영향을 미치게 되고 운동 계획 및 자세 조절을 어렵게 한다(Blanche et al., 1998; Kurzet et al., 2015).

경직형 뇌성마비는 근위부가 원위부에서 더 심각한 운동장애를 보인다. 원위부 근육에서는 근위부 근육보다 주동근과 비주동근의 부적절한 동시활성화가 더 많이 일어나 선택적이고 수의적인 운동 조절이 어려우며 근육이 약화된다(Fowler et al., 2010). 이에 본 연구는 경직형 뇌성마비 아동의 신체기능 수준과 관련하여 하지의 촉각 인식 정도를 알아보아 뇌성마비 치료 설계에 도움이 되는 자료를 제공하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 연구대상

본 연구는 Y시에 소재하는 Y대학 병원에 내원하는 뇌성마비 아동 중 연구 조건에 맞는 경직형 뇌성마비 15명을 대상으로 진행하였다. 모든 아동과 보호자에게 본 연구의 취지에 대해서 충분한 설명을 제공한 후 자발적인 실험 참여 동의를 얻었다. 연구대상 아동들은 등을 뒤에 기대거나 발을 땅에 닿지 않고도 치료용 테이블 가장자리에 걸쳐 앉는 자세를 유지할 수 있었으며, 소아 의식 척도(rancho los amigos) 8단계 이상에 해당되어 임상적 조치와 측정에 필요한 명령을 원활하게 따를 수 있었다. 근골격계 손상이 있거나 신경외과 또는 정형외과 수술 병력, 최근 6개월 이내 보툴리눔 독소 주사 치료를 받은 아동은 연구대상에서 제외되었다. 대상자들의 나이, 성별, 키, 몸무게는 설문조사를 실시하였고 이를 토대로 신체질량 지수

(body mass index, BMI)를 계산하였다. 본 연구는 B시 K대학교 생명윤리위원회(institutional review board, IRB)에 의해 승인 받았다(KSU-20-12-008).

2. 측정 방법 및 도구

1) 신체기능

(1) 균형

균형은 한국판 아동용 몸통 조절 측정 도구(korean version of trunk control measurement scale, K-TCMS)의 앉은 자세에서의 동적 균형 능력 척도 항목으로 평가 하였다. 이 항목은 총 7개로 구성되며 세부 항목은 다음과 같다. 몸통을 고정된 채 전방으로 약 45° 기울인 후 다시 시작 자세로 돌아오기, 몸통을 고정된 채 후방으로 약 45° 기울인 후 다시 시작 자세로 돌아오기, 좌·우 대퇴골두 위치의 테이블에 팔꿈치를 닿게 한 후 다시 시작 자세로 돌아오기, 좌·우 한쪽 골반을 각각 들어올리게 하고 다시 시작 자세로 돌아오기, 머리를 앞을 보게 고정시킨 후 상부 몸통을 3회 회전하기, 머리를 앞을 보게 고정시킨 후 하부 몸통을 3회 회전하기, 양팔을 가슴 앞으로 교차 시킨 상태에서 골반을 전방으로 3회 움직인 후 다시 후방으로 3회 움직여 시작 자세로 돌아오기로 구성된다(Yun & Lee, 2023). 측정은 아동이 테이블에 걸쳐 앉은 자세를 유지한 상태에서 치료사가 직접 아동에게 시범을 보인 후 아동이 각 항목마다 3회씩 수행하게 한 후 가장 높은 점수를 선택하여 기록하였다. K-TCMS의 동적 균형 능력 점수는 최고 28점에서 최저 0점까지 산정되며 점수가 높을수록 아동의 동적 균형 능력이 좋음을 뜻한다(Verheyden et al., 2004). K-TCMS의 평가자간 신뢰도는 ICC=0.969~0.992, 평가-재평가신뢰도는 ICC=0.827~0.932이다.

(2) 대동작 기능

대동작 기능 수준은 GMFCS(gross motor function system, GMFCS)로 분류하였으며 GMFCS는 5단계로

나뉜다. 1단계는 어려움 없이 걸을 수 있으나 숙련된 동작은 제한이 있는 상태, 2단계는 보조도구 없이 집안에서 걸을 수 있으나 집밖/지역사회에서는 제한이 있는 상태, 3단계는 보조도구를 사용하여 집안에서 걸을 수 있으나 집밖/지역사회에서는 제한이 있는 상태, 4단계는 휠체어나 전동휠체어를 사용하여 스스로 이동하는 상태, 5단계는 보조공학을 사용해도 스스로는 이동이 심하게 제한된 상태를 의미한다(Palisano et al., 2000).

(3) 경직

경직은 임상적으로 가장 많이 사용되는 수정된 애쉬워스 척도(modified Ashworth scale, MAS)로 평가하였다. 수정된 애쉬워스 척도에 따르면 경직의 수준은 6단계로 평가되는데 0단계는 근 긴장의 증가가 없는 상태, 1단계는 약간의 근 긴장의 증가가 있고 운동범위 마지막에서 약간의 저항을 느끼는 상태, 1+단계는 약간의 근 긴장의 증가가 있고 운동범위 1/2 이하에서 약간의 저항을 느끼는 상태, 2단계는 관절 움직임은 가능하나 관절가동범위 대부분에 걸쳐 근 긴장이 현저하게 증가되어 있는 상태, 3단계는 현저한 근 긴장의 증가로 대부분의 관절가동범위에서 수동 운동이 어려운 상태, 4등급은 관절 움직임 시 강직이 느껴지는 상태이다(Bohannon & Smith, 1987). 측정은 아동을 눕혀 이완시킨 후 치료사의 한쪽 손으로 아동의 무릎이 구부러지지 않도록 종아리 부분을 감싸고 반대쪽 손으로 긴장도가 더 심한 쪽의 발목 관절을 1회 배측 굴곡 시켜 측정하였다.

2) 하지 촉각

하지 촉각은 베이스라인 터치 테스트(Baseline Tactile Semmes-Weinstein Monofilaments, Fabrication, USA)를 사용하여 뇌성마비 아동들의 긴장도가 더 심한 쪽을 택하여 측정하였다. 베이스라인 터치 테스트는 직경에 따라 2.83, 3.61, 4.31, 4.56, 5.07, 6.65 모노필라멘트의 번호가 있으며, 가장 작은 직경의 모노필라

멘트부터 큰 직경의 모노필라멘트 순서로 측정한다. 2.83 모노필라멘트를 식별하면 감각 정상, 3.61 모노필라멘트 식별 시 가벼운 촉각 감소, 4.31 모노필라멘트 식별 시 보호 감각의 감소, 4.56 모노필라멘트 식별 시 보호 감각의 상실, 5.07 모노필라멘트 식별 시 깊은 부위 압각 외의 모든 감각의 손실, 6.65 모노필라멘트 무반응 경우 모든 감각의 결손을 의미하며 급내상관 계수는 0.75~0.84이다(van Brakel et al., 1996)(Fig. 1). 측정 부위는 첫 번째 발허리뼈 머리의 발바닥 부위, 다섯 번째 발허리뼈 머리의 발바닥 부위, 발뒤꿈치 부위, 무릎뼈와 발목관절 중간의 정강이 앞쪽 부위, 무릎뼈부위, 위앞엉덩뼈가시와 무릎뼈 중간 넓다리 부위로 총 6곳이다(Fig. 2). 부위 각각에 모노필라멘트가 구부러질 때까지 천천히 눌러 1.5초 동안 안정되게 유지하였다. 세 번의 시도 중 두 번 올바르게 식별한

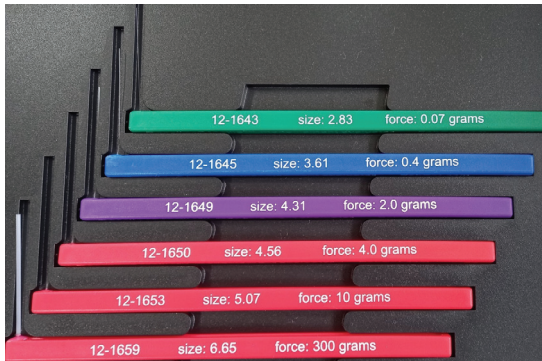


Fig. 1. Baseline Tactile Semmes-Weinstein Monofilaments.



Fig. 2. Light touch pressure area.

더 얇은 모노필라멘트 값을 채택하였고 모든 과정은 아동의 시각적 피드백 없이 무작위로 진행하였다.

3. 통계

경직형 뇌성마비 아동의 일반적인 특성은 평균과 표준편차, 빈도로 제시하였고 신체기능과 하지 촉각은 중앙값 및 사분위수 범위, 평균으로 나타내었다. 또한 대상자들의 신체기능 수준에 따른 하지 부위별 촉각 인식을 알아보기 위해 스피어만(Spearman) 상관 계수 분석을 실시하였다. 통계 프로그램은 SPSS 26.0(IBM SPSS Inc. USA)을 사용하였으며 유의수준 (α)은 0.05로 하였다.

Ⅲ. 연구 결과

1. 연구 대상자의 특성

연구에 참여한 뇌성마비 아동은 총 15명으로 양하지 마비 10명, 편마비 4명, 사지마비 1명이며, 평균 연령은 9.20±3.53세이다. 그 외 본 연구에 참여한 연구 대상자의 일반적 특성은 다음과 같다(Table 1).

대상자들의 신체기능 중앙값 및 사분위수 범위는 동적 균형 13(6-24)점, 경직 1(1-3)단계, 대동작기능

Table 1. General characteristics of subjects (n=15)

Variables		Subjects
Age(years)		9.20±3.53
Height(cm)		128.41±17.49
Weight(kg)		28.26±10.99
BMI(kg/m ²)		17.58±6.40
Gender	Male	9(60%)
	Female	6(40%)
Type	Diplegia	10(66.7%)
	Hemiplegia	3(20.%)
	Quadriplegia	1(13.3%)

Mean±SD

1(1-2)단계이다. 하지 부위별 촉각 평균값은 첫 번째 발허리뼈 머리의 발바닥 4.31, 다섯 번째 발허리뼈 머리의 발바닥 4.31, 발뒤꿈치 4.56, 종아리 앞쪽 4.56, 무릎뼈 3.18, 허벅지 중간 3.42으로 측정 되었다(Table 2).

2. 신체 기능과 하지 촉각

대상자들의 신체기능 수준과 하지 촉각 인식의 상관관계 분석 결과는 다음과 같다. 앉은 자세에서의 동적 균형 능력과 첫 번째 발허리뼈 머리의 발바닥 ($r=0.10$), 다섯 번째 발허리뼈 머리의 발바닥($r=-0.7$), 발뒤꿈치($r=0.14$), 종아리 앞쪽($r=-0.44$), 무릎뼈 ($r=-0.45$)는 상관관계가 없었고, 허벅지 중간($r=-0.72$)은 강하고 뚜렷한 음의 상관관계를 보여 균형 능력이 떨어질수록 근위부의 촉각 저하를 보였다 ($p<0.01$)(Table 3). 대동작 기능 수준과 첫 번째 발허리뼈 머리의 발바닥($r=-0.12$), 다섯 번째 발허리뼈 머리의 발바닥($r=-0.02$), 발뒤꿈치($r=0.02$), 종아리 앞쪽 ($r=0.45$), 무릎뼈($r=0.42$)는 상관관계가 없었고, 허벅지 중간($r=0.61$)은 뚜렷한 양의 상관관계를 보여 대동작 기능 수준이 낮을수록 근위부에 촉각 저하를 보였다 ($p<0.05$). 경직과 첫 번째 발허리뼈 머리의 발바닥 ($r=-0.07$), 다섯 번째 발허리뼈 머리의 발바닥($r=-0.03$),

발뒤꿈치($r=-0.03$), 종아리 앞쪽($r=0.47$), 무릎뼈 ($r=0.31$)는 상관관계가 없었고, 허벅지 중간($r=0.57$)은 뚜렷한 양의 상관관계를 보여 경직이 높을수록 근위부에 촉각 저하를 보였다($p<0.05$)(Table 3).

IV. 고찰

인체가 올바르게 정확하게 움직이기 위해서는 몸통 안정성과 함께 정상적인 감각 처리 능력이 필요하다(Zarkou et al., 2020; B Riquelme et al., 2014). 몸감각은 부드럽고 정확한 움직임에 영향을 주며 손상을 예방하거나 최소화하고, 외부세계를 받아들이는데 기여한다(Lundy-Ekman, 2012). 또한 항중력 자세 및 움직임에 대한 지각, 나와 공간, 물체 사이의 관계를 이해하게 하여 우리 몸의 균형을 유지하게 하고 보행을 원활하게 한다(Kavounoudias et al. 1998; Hohne et al., 2012). 몸감각은 촉각의 위치와 역치, 두 점 분별, 양쪽 동시촉각, 피부그림감각, 입체감각인식, 진동, 통증, 온도감각 등의 피부감각과 고유수용성 감각 등으로 평가되며 피부, 근육, 관절에 분포되어 있는 몸감각수용기의 입력에 의해 크게 영향을 받는다(Bloem et al., 2000). 뇌성마비 아동의 불안정한 몸통과 골반은 신체 원

Table 2. Comparison of tactile sense and body function assessments in children with CP

Low extremity region	Mean (±SD)	Body function assessments	Median (IQR)
1 st Met(g)	4.31±3.08	TCMS-DS	13
5 th Met(g)	4.31±3.06	(score)	(6-24)
Heel(g)	4.56±3.51	GMFCS	1
AS(g)	4.56±3.04	(level)	(1-3)
Patella(g)	3.18±0.49	MAS	1
MT(g)	3.42±0.70	(level)	(1-2)

Met: metatarsal head, AS: anterior shank, MT: mid-thigh, TCMS-DS: trunk control measurement scale-dynamic stability, GMFCS: gross motor function classification system, MAS: modified Ashworth scale

Table 3. Spearman correlations between the tactile sense and body function in children with CP

	Body function assessments		
	TCMS-DS	GMFCS	MAS
1 st Met	.10	-.12	-.07
5 th Met	-.07	-.02	-.03
Heel	.14	.02	-.03
AS	-.44	.45	.47
Patella	-.45	.42	.31
MT	-.72**	.61*	.57*

* $p<.05$, ** $p<.001$

Met: metatarsal head, AS: anterior shank, MT: mid-thigh, TCMS-DS: trunk control measurement scale-dynamic stability, GMFCS: gross motor function classification system, MAS: modified Ashworth scale

위부의 경직을 증가시키고 왜곡된 운동 감각을 뇌에 전달한다(Kurz et al., 2015; Papadelis et al., 2014; van Roon et al., 2005; Zarkou et al., 2020; B Riquelme et al., 2014). 뇌성마비의 약 90%는 가벼운 터치 압력, 두 점 분별력, 입체 감각, 진동, 고유수용성 감각, 하지 통증 감각과 위치 감각 등 몸감각 장애가 있다고 하였다(Auld ML et al., 2011; Wingert et al., 2008). 비장애 아동과 뇌성마비 아동을 대상으로 감각을 비교한 선행연구에서 실험에 참가하였던 모든 뇌성마비 아동들이 비장애 아동들에 비해 상대적인 두점 식별 피로감각, 발과 발목의 감각 저하를 보였다(Zarkou et al., 2021). 본 연구에서도 균형, 대동작 기능, 경직 등 신체적 기능이 저하된 뇌성마비 아동들이 하지 모든 부위에서 감각 정상을 나타내는 2.83 모노필라멘트를 식별하지 못하는 것으로 나타나 선행연구와 일치함을 확인할 수 있었다.

몸감각의 손상은 균형 제어 불량에 원인이 될 수 있고 경직을 증가시켜 우리몸이 안전하게 움직이고 환경과의 상호작용 및 적응을 하는 것을 어렵게 한다(Bleyenheuft & Gordon, 2013; Kavounoudias et al. 1998; Fitzpatrick et al 1994; Kennedy & Inglis, 2002). 뇌성마비 아동의 비정상적인 동작과 비대칭적인 자세 조절 패턴은 움직임에 대한 불안과 두려움으로 이어져 뇌성마비 아동이 다양한 경험을 시도하지 못하게 한다. 또한, 갑작스런 위험 상황으로부터 반사적 자세 조절을 어렵게 하여 사고로 이어지며 또다시 뇌성마비 아동의 감각 저하로 이어지는 악순환이 되풀이된다(Blanche & Burke, 1991; Donker., et al., 2008; Sugden & Keogh, 1990). 경직형 뇌성마비 아동은 근위부보다 원위부에서 경직이 더 높게 나타남에 따라 선택적이고 수의적인 운동조절이 어렵고 촉각 감소가 더 나타난다(Fowler et al., 2010; Zarkou et al., 2021). 본 연구에서도 뇌성마비 아동들의 신체내에서 경직이 높은 원위부에 해당하는 발부위가 허벅지에 비해 촉각 역치값이 평균적으로 더 높게 나타나는 경향을 보여 선행연구 결과를 뒷받침 하였다.

뇌성마비 아동의 초기의 감각 처리 문제는 이후

아동의 신체 기능 발달에 심각한 장애를 초래한다(Shumway-Cook & Horak, 1986). 신체기능 장애로 인한 비정상적인 움직임과 자세조절 능력 감소는 이후 뇌성마비의 감각 경험에 부정적인 영향을 미치게 된다(Blanche et al., 1995). 본 연구에서 경직형 뇌성마비 아동의 신체기능 수준에 따른 하지 부위별 촉각 인식 정도를 알아보았을 때 뇌성마비 아동의 낮은 신체기능과 하지 근위부의 촉각 감소가 매우 관련성이 높은 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 뇌성마비 아동의 초기 손상된 감각처리 능력과 잘못된 감각 경험이 신체기능 발달을 더욱 어렵게 하고, 이런 낮은 신체기능이 뇌성마비 아동으로 하여금 다양한 감각을 경험하고 도전할 수 있는 기회를 제한하여 근위부까지도 감각 감소가 나타났기 때문일 것으로 생각된다.

본 연구의 제한점은 다음과 같다. 연구 대상자의 수가 적어 모든 경직형 뇌성마비 아동들에게 본 연구의 결과를 일반화 시키기 어렵다는 것이다. 또한, 신체기능이 떨어질수록 근위부의 감각저하 문제에 대한 원인을 해석함에 있어 과학적인 실험에 근거한 것이 아니라 연구자의 자의적인 해석이라는 것이다. 따라서 본 연구의 제한점을 보완하여 추후에는 더 많은 경직형 뇌성마비를 대상으로 하는 연구와 감각에 따른 신체기능 변화, 신체기능에 따른 감각의 변화를 추적 관찰하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

V. 결론

본 연구에서는 경직형 뇌성마비 아동의 신체기능과 하지 촉각의 상관관계를 알아보았고 연구 결과 경직형 뇌성마비 아동의 하지 원위부의 촉각 감소가 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 균형능력, 대동작 기능수준, 경직 등 신체기능이 낮은 아동일수록 하지 근위부의 촉각감소가 나타나는 것을 확인하였다. 감각장애는 자세 조절 성능 저하와 관련이 있을 수 있다. 뇌성마비 아동의 움직임을 개선하기 위한 치료 접근시 신체기능이 떨어질수록 경직이 높은 원위부 뿐만 아니라 근위부

에도 감각 소실이 있음을 고려하여 접근하는 중재 방식을 가져야 한다는 것을 제안하는 바이다.

References

- Auld ML, Boyd R, Moseley GL, et al. Tactile function in children with unilateral cerebral palsy compared to typically developing children. *Disability and Rehabilitation*. 2012;34(17):1488-1494.
- Ayres AJ. *Sensory integration and praxis tests (SIPT)*. Los Angeles: Western Psychological Services (WPS). 1996.
- Blanche E, Burke JP. Combining neurodevelopmental and sensory integration approaches in the treatment of the neurologically impaired child. part 2. *Sensory Integration Quarterly*. 1991;19(1):1-2.
- Blanche EI, Botticelli TM, Hallway MK, et al. Combining neuro-developmental treatment and sensory integration principles: An approach to pediatric therapy. *San Antonio TX: Therapy Skills Builders*. 1998.
- Bleyenheuff Y, Gordon AM. Precision grip control, sensory impairments and their interactions in children with hemiplegic cerebral palsy: A systematic review. *Research in Developmental Disabilities*. 2013;34(9):3014-3028.
- Bloem B, Allum J, Carpenter M, et al. Is lower leg proprioception essential for triggering human automatic postural responses? *Experimental Brain Research*. 2000;130(3):375-391.
- Bohannon RW, Smith MB. Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity. *Physical Therapy & Rehabilitation Journal*. 1987;67(2):206-207.
- Burton H, Dixit S, Litkowski P, et al. Functional connectivity for somatosensory and motor cortex in spastic diplegia. *Somatosensory & Motor Research*. 2009;26(4):90-104.
- Cascio CJ. Somatosensory processing in neurodevelopmental disorders. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*. 2010;2:62-69.
- Clayton K, Fleming JM, Copley J. Behavioral responses to tactile stimuli in children with cerebral palsy. *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics*. 2003;23(1):43-62.
- Dannenbaum RM, Dykes RW. Sensory loss in the hand after sensory stroke: Therapeutic rationale. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1988;69(10):833-839.
- Donker SF, Ledebt A, Roerdink M, et al. Children with cerebral palsy exhibit greater and more regular postural sway than typically developing children. *Experimental Brain Research*. 2008;184:363-370.
- Fitzpatrick R, Rogers DK, McCloskey DI. Stable human standing with lower-limb muscle afferents providing the only sensory input. *The Journal of Physiology*. 1994;480(2):395-403.
- Fowler EG, Staudt LA, Greenberg MB. Lower-extremity selective voluntary motor control in patients with spastic cerebral palsy: Increased distal motor impairment. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2010;52(3):264-269.
- Höhne A, Ali S, Stark C, et al. Reduced plantar cutaneous sensation modifies gait dynamics, lower-limb kinematics and muscle activity during walking. *European Journal of Applied Physiology*. 2012;112:3829-3838.
- Hoon AH, Lawrie WT, Melhem ER, et al. Diffusion tensor imaging of periventricular leukomalacia shows affected sensory cortex white matter pathways. *Neurology*. 2002;59(5):752-756.
- Kavounoudias A, Roll R, Roll J. The plantar sole is a 'dynamometric map' for human balance control. *Neuroreport*. 1998;9(14):3247-3252.
- Kennedy PM, Inglis JT. Distribution and behaviour of glabrous cutaneous receptors in the human foot sole. *The Journal of Physiology*. 2002;538(3):995-1002.

- Kurz MJ, Becker KM, Heinrichs-Graham E, et al. Neurophysiological abnormalities in the sensorimotor cortices during the motor planning and movement execution stages of children with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2014;56(11):1072-1077.
- Kurz MJ, Heinrichs-Graham E, Becker KM, et al. The magnitude of the somatosensory cortical activity is related to the mobility and strength impairments seen in children with cerebral palsy. *Journal of Neurophysiology*. 2015;113(9):3143-3150.
- Lundy-Ekman L. Neuroscience-e-book: fundamentals for rehabilitation. Elsevier Health Sciences. 2012.
- McLaughlin JF, Felix SD, Nowbar S, et al. Lower extremity sensory function in children with cerebral palsy. *Pediatric Rehabilitation*. 2005;8(1):45-52.
- Palisano RJ, Hanna SE, Rosenbaum PL, et al. Validation of a model of gross motor function for children with cerebral palsy. *Physical therapy*. 2000;80(10):974-985.
- Papadelis C, Ahtam B, Nazarova M, et al. Cortical somatosensory reorganization in children with spastic cerebral palsy: A multimodal neuroimaging study. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2014;8:725.
- Papadelis C, Butler EE, Rubenstein M, et al. Reorganization of the somatosensory cortex in hemiplegic cerebral palsy associated with impaired sensory tracts. *NeuroImage: Clinical*. 2018;17:198-212.
- Riquelme I, Padrón I, Cifre I, et al. Differences in somatosensory processing due to dominant hemispheric motor impairment in cerebral palsy. *BMC Neuroscience*. 2014;15:1-9.
- Rosenbaum P, Paneth N, Leviton A, et al. A report: The definition and classification of cerebral palsy april 2006. *Developmental Medicine & Child Neurol Suppl*. 109(suppl 109). 2007;8-14.
- Shumway-Cook A, Horak FB. Assessing the influence of sensory interaction on balance: Suggestion from the field. *Physical Therapy*. 1986;66(10):1548-1550.
- Sugden D, Keogh J. Problems in movement skill development. University of South Carolina Press, Columbia. 1990.
- Umansky, R. The hand sock, an artificial handicap to prehension in infancy, and its relation to clinical disuse phenomena. *Pediatrics*. 1973;52(4):546-554.
- van Brakel WH, Khawas IB, Gurung KS, et al. Intra-and Inter-Tester Reliability of Sensibility Testing in Leprosy'. *INTERNATIONAL JOURNAL OF LEPROSY*. 1996;64(3):287-298.
- van Roon D, Steenbergen B, Meulenbroek RG. Trunk use and co-contraction in cerebral palsy as regulatory mechanisms for accuracy control. *Neuropsychologia*. 2005;43(4):497-508.
- Verheyden G, Nieuwboer A, Mertin J, et al. The trunk impairment scale: a new tool to measure motor impairment of the trunk after stroke. *Clinical Rehabilitation*. 2004;18(3):326-334.
- Wingert JR, Burton, H, Sinclair RJ, et al. Tactile sensory abilities in cerebral palsy: Deficits in roughness and object discrimination. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2008;50(11):832-838.
- Wingert JR, Burton H, Sinclair RJ, et al. Joint-position sense and kinesthesia in cerebral palsy. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2009;90(3):447-453.
- Yun HL, Lee EJ. Effects of Wole Body Vibration Training on Transverse Abdominis Muscle Thickness and Sitting Balance in Spastic Cerebral Palsy. *Journal of Korean Physical Therapy Science*. 2023;30(1):72-84.
- Zarkou A, Lee SC, Prosser LA, et al. Foot and ankle somatosensory deficits affect balance and motor function in children with cerebral palsy. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2020;14:45.
- Zarkou A, Lee SC, Prosser L, et al. Foot and ankle somatosensory deficits in children with cerebral palsy: A pilot study. *Journal of Pediatric Rehabilitation Medicine*. 2021;14(2):247-255.