

하지 근력이 만성 뇌졸중 환자의 보행 시 하지 관절의 협응패턴에 미치는 영향

Effect of Muscle Strength of Lower Extremity on the Coordination Pattern for Chronic Stroke Patients during Walking

임희성(한국체육대학교 강사) · 박상헌*(한국스포츠정책과학원 연구위원)

Heesung Lim Korea National Sport University · Sangheon Park* Korea Institute of Sport Science

요약

본 연구의 목적은 뇌졸중 환자의 마비측과 비마비측 근력이 보행 시 하지 내 협응(CRP) 및 협응패턴 변화(CRPv)에 미치는 영향을 살펴봄으로써, 뇌졸중 환자의 재활 효과를 증대시키기 위한 과학적인 근거를 마련하는데 있다. 본 연구는 경기도에 소재한 U 장애인 복지관에 등록되어 있는 뇌졸중 환자 10명을 대상으로 하였다. 모든 대상자들은 등속성 근기능 검사장비를 통하여 등척성 근력을 측정하였으며, 적외선 카메라를 통하여 보행 시 위치데이터를 취득하였다. 이를 통하여 보행 시 나타나는 CRP와 CRPv를 산출하였다. 본 연구 결과, 뇌졸중 환자의 마비측 협응패턴은 발목 관절의 근력과 관련이 있으며, 비마비측 협응패턴은 엉덩 관절과 무릎 관절 그리고 발목 관절 근력이 모두 전반적으로 관련이 있음을 나타냈다($p<0.05$). 그리고 발목 관절의 배측굴곡근의 근력이 강할수록 구조적으로 강인하게 하지를 제어할 수 있었으며, 비마비측은 무릎 관절의 굴곡근과 발목 관절의 배측굴곡근의 근력이 좋을수록 보행 시 충격 흡수 및 추진력 향상에 있어서 올바른 움직임을 형성함을 나타냈다. 또한, 비마비측 엉덩 관절의 굴곡근 근력이 강할수록 비마비측에 편중된 확고한 전략을 사용하는 것으로 나타났으며, 마비측 무릎 관절의 굴곡근이 강할수록 다양한 전략을 사용한 보행 패턴을 나타냈다. 따라서 본 연구의 결과는 뇌졸중 환자의 기능적 향상을 위한 근력 트레이닝 시 특정 관절의 협응 패턴을 선택적으로 강화시키고, 재활을 진행함에 있어서 발생할 수 있는 위험요인을 사전에 예측할 수 있는 정량적인 근거를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of muscle strength on the paraplegic and non-paraplegic side of stroke patients on intra-lower limb coordination (CRP) and coordination variability (CRPv) during walking. Ten stroke patients, who registered at the U Welfare Center for the Disabled in Gyeonggi-do, were participated in this study. Isometric muscle strength were measured. The raw data was acquired while walking through an infrared camera. The CRP and CRPv were calculated in this study. As a result of this study, it was shown that the coordination pattern on the paraplegic side of stroke patients was related to the strength of the ankle joint, and the coordination pattern on the non-paraplegic side was overall related to the strength of the hip joint, knee joint, and ankle joint ($p<0.05$). Moreover, the greater the dorsiflexor muscle strength makes the stronger the lower extremity control. In the non-paraplegic side, the better the strength of the knee flexor and dorsiflexor muscles of the ankle joint provide the more correct movement for absorbing shock and improving propulsion during walking. Therefore, the results of this study can provide a quantitative basis for selectively strengthening the coordination pattern of specific joints. Also, This results can provide the information for functional improvement of stroke patients and predicting risk factors that may occur during rehabilitation.

Key words : Stroke, Coordination, Muscle Strength, Walking

1. 서론

뇌졸중(stroke)은 대표적인 중추신경계 질환 중 하나로, 혈액이 뇌 조직에 부분적으로 공급되지 않아 발생하게 되며 뇌 기능의 손실을 초래하고, 신체의 기능적 장애(functional disorder)를 유발하게 된다(Prange, Jannink, Groothuis-Oudshoorn, Hermens, & Ijzerman, 2006). 일반적으로 뇌졸중 발병 후 뇌졸중 환자들은 신경 손상에 의한 편측 마비(hemiplegia) 증상을 겪게 되며, 영구적인 장애를 예방하기 위하여 지속적인 재활을 필요로 한다(Duncan et al., 2005). 뇌졸중 환자들이 겪는 신체적 변화는 손상 정도에 따라 각기 다를 수 있지만, 하지 근력의 약화가 대표적이다. 하지 근력의 약화는 운동 조절 능력 및 균형 능력을 감소시키고, 통증과 경직 등을 가중시키며 환자들의 일상 생활에 부정적인 영향을 끼치게 된다(Eng & Chu, 2002).

뇌졸중 환자들에게 하지 근력의 약화는 보행과 같은 일상생활의 동작을 수행하기 위하여 반드시 해결되어야 할 주요 문제 중 하나이다. 특히 마비측의 만성적인 근육 미사용은 자발적인 근 수축 능력을 감소시키고, 미사용 된 마비측의 신체부위를 담당하는 대뇌 운동겔질(motor cortex)의 위축을 초래하여 불완전 마비를 더욱 심화시킬 가능성이 있다(Gracies, 2005a, 2005b). 더불어, 근 수축 시 근 활성의 강도 및 적절한 시점에서의 수축을 어렵게 하여, 뇌졸중 환자들에 전반적인 기능적인 움직임 능력의 감소를 불러일으킬 수 있다. 또한 선행연구에 따르면, Saunders et al. (2016)과 Snow, Low, Thompson (2012)은 뇌졸중 환자의 보행을 포함한 일상 생활에 있어서 하지 근력 강화는 필수적이라고 하였으며, 이러한 근력의 강화는 기능적인 움직임 뿐 만 아니라, 심폐능력, 인지 능력 등과 같은 뇌졸중 환자가 삶을 영위하는데 필수적인 능력들을 향상시키는데 도움을 줄 수 있다고 보고하였다.

현재 다양한 선행연구들에서는 뇌졸중 환자들의 근력과 기능적 움직임의 관계를 살펴보기 위한 연구들이 진행되어 왔다. Horstman et al. (2008)은 뇌졸중 환자들에 마비측과 비마비측 근력 차이와 근력이 기능적 움직임에 미치는 영향을 상관관계분석을 통하여 살펴본 결과, 근력 및 수의적인 근활성도 그리고 기능적 수행능력 검사는 높은 상관관계를 나타낸다고 보고하였으며, 또한 Sackley (1991)는 뇌졸중 환자들을 대상으로 근력과 정적 및 동적 균형 능력을 살펴본 결과, 근력이 약한 뇌졸중 환자들은 동적 균형 능력에서도 낮은 점수를 나타냈으며, 때문에 근력이 약한 뇌졸중 환자들은 낙상에 더 쉽게 노출 될 수 있다고 언급하였다. 그리고 Bohannon, & Walsh (1991)는 뇌졸중 환자와 골다공증 환자와 같이 신경학적, 정형외과적 질환을 가진 대상자들은 일관적으로 하지 근력이 약하고, 동시에 균형 능력이 떨어지는 현상을 나타낸다고 보고 하였다. 이처럼 하지 근력은 뇌졸중 환자들에게 있어서 반드시 개선되어야 할 재활 요인 중 하나로써, 그 중요성이 매우 높다. 즉, 실제 뇌졸중 환자들의 하지 근력이 보행과 같은 기능적인 움직임에 미치는 영향을 파악하고, 이를 이해하는 것은 뇌졸중 환자들의 재활 효과를 증대시키는데 있어서 반드시 선행되어야 할

과정이다.

보행은 인간의 움직임에 있어서 지극히 일상적인 동작이지만, 시공간적으로 매우 복잡한 과정의 연속이며, 이를 성공적으로 수행하기 위해서는 신체 분절과 관절의 조화로운 “협응(coordination)”이 이루어져야 한다(Kelso, 1995). 뇌졸중 환자의 보행 시에도 많은 근육과 관절들의 협응이 이루어지게 되고, 실제 재활 과정에서 역시 협응 능력을 향상시키기 위한 다양한 중재(intervention)들이 시도된다(Dietz, Fouad, & Bastiaanse, 2001; Dietz, Ketelsen, Berger, & Quintern, 1986). 그러나 이러한 중재 훈련에도 불구하고, 뇌졸중 환자들은 일상생활에서 여전히 부족한 협응을 경험하게 된다(Biernaskie & Corbett, 2001). 일반적으로 뇌졸중 환자들에 부족한 협응 움직임은 편마비가 주된 원인이 되며, 이로 인해 보행 시 과도하게 에너지를 소비하게 되고, 비효율적인 패턴을 지속적으로 구사하게 된다(Butefisch, Hummelsheim, Denzler, & Mauritz, 1995). 따라서 뇌졸중 환자들이 보다 효율적으로 보행 움직임을 수행하기 위해서는 올바른 협응 패턴이 구사되어야 하며, 이를 측정하고, 평가하기 위하여 협응을 정량화하기 위한 방법이 필요하다.

지금까지, 운동역학분야에서는 분절과 관절들의 협응패턴을 정량화하기 위한 다양한 연구들이 진행되어왔다. 그 중 연속상대위상(continuous relative phase [CRP])은 해당되는 관절과 분절들의 협응을 평가하기 위하여 고안된 방법으로, 두 개 이상의 분절 혹은 관절의 협응(CRP) 및 협응패턴의 변화(CRP variability [CRPv])를 정량화하여 제시한다(Hamill, van Emmerik, Heiderscheit, & Li, 1999; Li, van den Bogert, Caldwell, van Emmerik, & Hamill, 1999). 많은 연구자들이 CRP가 보행 시 전반적인 협응패턴을 살펴보기 유용한 변인이라고 제안하였으며, Barela, Whittall, Black, Clark (2000)는 실제로 CRP를 통하여 보행 시 각 구간에서 나타나는 협응패턴을 분석하여 제시하였다. 또한, Hutin et al. (2010, 2011)은 CRP를 통하여 정상보행과 뇌졸중 환자들의 협응패턴을 비교하였으며, 뇌졸중 환자들에 CRP 및 CRPv의 경우 정상보행과 다르게 후기 지지기 후 그 값이 증가하여, 부드럽지 못한 움직임의 협응패턴을 보인다고 보고하였다. 이와 같이 CRP를 통하여 보행 시 분절과 관절 간의 협응을 평가하는 것은 보행의 형태를 전반적으로 평가할 수 있다는 점에서 의미 있는 작업이라 할 수 있으며 특히, 뇌졸중 환자들의 협응 능력을 평가하는 것은 뇌졸중 환자들의 경우 보행 시 움직임을 조절할 수 있는 협응 능력이 재활의 주된 목표인 중추신경계의 운동 조절 기능을 대변할 수 있기 때문에 재활을 진행함에 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다. 더불어, CRP는 연속적인 시·공간적인 정보를 모두 포함한다는 점에서 뇌졸중 환자들의 변화무쌍한 동작을 평가하기에 적합한 변인이라 할 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 뇌졸중 환자들의 마비측과 비마비측 근력이 보행 시 하지 내 협응(CRP) 및 협응패턴 변화(CRPv)에 미치는 영향을 살펴봄으로써, 뇌졸중 환자들의 재활 효과를 증대시키기 위한 과학적인 근거를 마련하는데 있다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 경기도에 소재한 U 장애인 복지관에 등록되어 있는 뇌졸중 환자 10명(age: 61.9 ± 7.6 yrs., height: 162.0 ± 9.0 cm, weight: 61.6 ± 6.7 kg, on-set year: 12.4 ± 7.5 yrs.)을 대상으로 수행되었다. 본 연구의 대상자는 뇌졸중 발병 후 2년이 경과한 자로 간이정신상태검사(MMSE-K) 점수가 24점 이상으로 인지장애가 없으며, 정형외과적 문제, 시각 장애 및 청각 장애가 전혀 없는 자들로 선정되었다. 본 연구는 K대학교 생명윤리위원회의 연구윤리승인을 마친 후 진행되었으며(KNSU 20200612-077), 연구가 진행되기 앞서 모든 대상자들은 연구에 대한 충분한 설명과 함께 자발적으로 동의서를 작성하였다.

2. 자료수집

본 연구는 뇌졸중 환자들의 하지 근력이 보행 시 하지 내 협응 및 협응패턴 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실시되었다. 하지 근력은 등속성 근기능 검사장비(Cyberex Humac Norm, CSMI, USA)를 통해 등척성 근력이 측정되었으며, 엉덩, 무릎 그리고 발목 관절의 굴곡근과 신전근(발목: 배측굴곡근, 저측굴곡근)이 측정되었다. 먼저 엉덩 관절과 발목 관절의 근력은 대상자가 똑바로 누운 상태에서 무릎 관절을 90도 구부린 자세로 굴곡근과 신전근을 측정하였고, 무릎 관절의 근력은 대상자가 앉은 상태에서 무릎을 90도 구부린 자세로 굴곡근과 신전근을 측정하였다. 이때 모든 근력 측정은 검사 시 노이즈(noise)를 감안하여 최소 토크를 10 Nm으로 설정하였다.

모든 대상자들의 보행 시 움직임을 촬영하기 위하여 8대의 적외선 카메라(Oqus 300+, Qualisys, Sweden; 100 Hz)를 보행을 실시할 보행로 주변에 설치하였다. 대상자들은 충분한 워밍업(warm-up) 후 5번의 보행을 수행하였으며, 각 대상자의 5스트라이드를 분석에 활용하였다. 이때, 각 대상자들은 하지 분절과 관절에 총 25개의 반사마커와 4개의 클러스터를 부착하였다. 모든 반사마커는 부착위치에 따른 데이터의 오류를 최소화하기 위하여 경험이 풍부한 명의 연구자가 일관적으로 부착하도록 하였다. 위와 같은 과정을 통하여 취득된 원자료는 Butterworth 2nd order low-pass filter를 사용하여 노이즈를 제거하였으며, 이때 차단 주파수(cut-off frequency)는 PSD (power spectrum density) 분석을 통하여 누적 주파수 99%의 값으로 설정하였다(Stergiou, Giakas, Byrne, & Pomeroy, 2002).

3. 자료처리

본 연구에서는 뇌졸중 환자들의 하지 근력이 보행 시 하지 내 협응 및 협응패턴 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 뇌졸중 환자들의 보행 시 나타나는 CRP와 CRP variability ([CRPv])를 산출하고자 하였다. 이에 따라 뇌졸중 환자들의 보행 시 대퇴, 하퇴, 발 분절과 엉덩 관절, 무릎 관절, 발목 관절의 위상각의 차를 이용

하여 분절과 관절의 시상면과 관상면, 그리고 수평면에서의 CRP와 CRPv를 계산하였다(대퇴 외/내전-하퇴 외/내전, 대퇴 외/내회전-하퇴 외/내회전, 하퇴 외/내회전-발 외/내번, 엉덩 관절 외/내전-무릎 관절 외/내회전, 엉덩 관절 외/내회전-무릎 관절 굴곡/신전, 엉덩 관절 외/내회전-무릎 관절 외/내전, 무릎 관절 외/내전-발목 관절 배측/저측 굴곡, 무릎 관절 굴곡/신전-발목 관절 외/내번, 무릎 관절 외/내회전-발목 관절 외/내번; Bates, James, & Ostermig, 1978; Hamill et al., 1999). 이때, 보행 시 적외선 카메라를 통하여 취득된 3차원 위치데이터를 활용하여 3차원 분절각과 관절각을 계산하였으며, 각 운동면에 따른 각변위(θ)와 각속도(ω)를 산출하였다. 각 데이터는 분석하고자 하는 구간을 기준으로 100%로 보간(normalization)되었으며, 수평축(각변위)과 수직축(각속도)을 기준으로 +1과 -1로 <공식 1>과 <공식 2>를 통하여 표준화되어 데카르트 좌표계(cartesian coordination system)로부터 극좌표계(polar coordination system)로 변환되었다. 극좌표계 내에서 각 분절과 관절의 위상각(phase angle)은 <공식 3>을 통하여 0-180°에서 계산되었고, 산출된 각 분절과 관절의 위상각의 차를 통하여 CRP로 표현되었다.

$$\begin{aligned}\text{공식 1: Horizontal - axis: } \theta_i &= \frac{2 \times [\theta_i - \min(\theta_i)]}{\max(\theta_i) - \min(\theta_i)} \\ \text{공식 2: Vertical - axis: } \omega_i &= \frac{\omega_i}{\max(|\omega_i|)} \\ \text{공식 3: Phase angle} &= \tan^{-1} \left(\frac{\theta_i}{\omega_i} \right)\end{aligned}$$

각 CRP의 값은 0°에 가까울수록 유사한 협응 패턴인 동조(in-phase), 180°에 가까울수록 반대 방향의 협응 패턴인 이조(out-of-phase)를 의미하게 된다. 또한 CRPv에 대한 정량적인 수치를 산출하기 위하여, 보간된 CRP양상을 곡선의 한순간 한순간의 표준편차(standard deviation)를 계산하여, 이를 표현하였다(van Emmerik & Wagenaar, 1996). 본 연구에서 활용된 모든 데이터는 마비측(paretic side [P])과 비마비측(non-paretic side [NP])으로 각각 구분하여, 해당 측면의 발이 지면에 닿는 순간(R/L heel-contact, Event 1)부터 동일한 측면의 다음 발이 지면에 닿는 순간(R/L heel-contact, Event 2)까지에 보행 주기(cycle)를 분석 구간(phase)으로 설정하였다.

4. 통계처리

본 연구는 보행 시 뇌졸중 환자들의 마비측과 비마비측의 하지 근력이 하지 내 분절과 관절의 CRP와 CRPv에 미치는 영향을 알아보기 위하여, SPSS 18.0 (IBM, USA) 프로그램을 통해 피어슨의 상관관계(Pearson's correlation)를 실시하였다. 이때 유의 수준은 $\alpha = .05$ 로 설정하였다.

III. 연구결과

1. 기술통계치(descriptive statistics)

본 연구에서 나타난 뇌졸중 환자들의 마비측과 비마비측 하지

Table 1. Descriptive statistics of muscle strength in lower extremities

unit: deg.

Variables	Side	Hip flexion	Hip extension	Knee flexion	Knee extension	Ankle dorsi.	Ankle plan.
Muscle strength (N*m/kg)	P	0,46 ±0,33	0,78 ±0,54	0,17 ±0,54	0,17 ±0,21	0,13 ±0,15	0,38 ±0,27
	NP	0,63 ±0,32	1,88 ±0,82	0,58 ±0,37	1,93 ±0,91	0,29 ±0,17	0,66 ±0,43

Note, paretic [P], non-paretic [NP].

Table 2. Descriptive statistics of CRP and CRPv between lower segments

unit: deg.

Variables	Side	Thigh abd./add. - Shank abd./add.	Thigh ext./int.rot. - Shank ext./int.rot.	Shank ext./int.rot. - Foot ever./inv.
CRP	P	50,82±27,33	36,56±16,66	115,77±13,32
	NP	50,90±19,43	34,57±8,60	105,14±14,24
CRPv	P	18,95±6,44	23,35±10,57	25,21±9,67
	NP	27,02±9,46	25,21±5,11	28,18±5,25

Note, paretic [P], non-paretic [NP].

Table 3. Descriptive statistics of CRP and CRPv between lower joints

unit: deg.

Variables	Side	Hip abd./add. - Knee ext./int.rot.	Hip ext./int.rot. - Knee flex/ext.	Hip ext./int.rot. - Knee abd./add.	Knee abd./add. - Ankle dorsi/plan.	Knee flex/ext. - Ankle ever./inv.	Knee ext./int.rot. - Ankle ever./inv.
CRP	P	56,46±20,49	71,56±18,14	64,99±20,19	78,99±16,63	112,68±20,18	91,24±21,89
	NP	68,94±17,61	86,20±18,08	66,26±22,73	90,45±20,74	113,55±13,43	77,37±25,67
CRPv	P	27,29±7,66	27,72±7,23	29,43±7,23	18,58±4,40	17,81±4,17	30,47±7,19
	NP	31,84±5,13	26,54±3,69	27,06±3,23	16,79±5,22	20,26±7,56	31,48±7,96

Note, paretic [P], non-paretic [NP].

Table 4. Correlation between muscle strength and coordination pattern of segments

Variables	Side	Thigh abd./add. - Shank abd./add.		Thigh ext./int.rot. - Shank ext./int.rot.		Shank ext./int.rot. - Foot ever./inv.	
		CRP r(ρ)	CRPv r(ρ)	CRP r(ρ)	CRPv r(ρ)	CRP r(ρ)	CRPv r(ρ)
Hip flexion	P	-17(62)	21(55)	14(68)	-10(77)	04(90)	-04(90)
	NP	49(15)	54(10)	-10(76)	-43(21)	-21(55)	09(79)
Hip extension	P	-28(41)	34(33)	08(82)	-01(97)	-09(78)	40(25)
	NP	00(99)	22(52)	14(68)	04(89)	-19(59)	17(63)
Knee flexion	P	-19(60)	33(34)	30(39)	27(45)	28(42)	07(83)
	NP	22(54)	20(56)	01(96)	-54(10)	-65(04)*	18(61)
Knee extension	P	-15(66)	20(56)	34(33)	33(34)	24(40)	-15(67)
	NP	39(25)	47(17)	13(70)	-38(27)	-43(20)	03(91)
Ankle dorsi.	P	67(03)*	45(18)	30(39)	18(60)	16(65)	-13(70)
	NP	58(07)	35(31)	-55(09)	-53(11)	30(39)	-34(33)
Ankle plan.	P	17(62)	11(75)	23(52)	22(52)	-02(94)	-18(61)
	NP	44(20)	06(85)	22(53)	-32(35)	-14(69)	-20(56)

Note, * significantly correlated at $p < .05$; paretic [P], non-paretic [NP].

Table 5. Correlation between muscle strength and coordination pattern of joints

Variables	Side	Hip abd./add. - Knee ext./int.rot.		Hip ext./int.rot. - Knee flex/ext.		Hip ext./int.rot. - Knee abd./add.		Knee abd./add. - Ankle dorsi/plan.		Knee flex/ext. - Ankle ever./inv.		Knee ext./int.rot. - Ankle ever./inv.	
		CRP r(ρ)	CRPv r(ρ)	CRP r(ρ)	CRPv r(ρ)	CRP r(ρ)	CRPv r(ρ)	CRP r(ρ)	CRPv r(ρ)	CRP r(ρ)	CRPv r(ρ)	CRP r(ρ)	CRPv r(ρ)
Hip flexion	P	25(46)	25(48)	-05(87)	-45(18)	-31(37)	-54(10)	-27(43)	-38(27)	-42(22)	25(47)	-47(16)	04(91)
	NP	64(04)*	04(89)	47(16)	-20(56)	28(41)	-38(27)	-01(96)	-06(86)	-37(28)	42(22)	-59(07)	26(46)
Hip extension	P	53(11)	44(19)	01(96)	-02(93)	-34(33)	-31(37)	-40(24)	02(93)	-38(27)	49(14)	-60(06)	26(46)
	NP	25(48)	-16(64)	31(36)	-32(36)	29(41)	-28(43)	-25(47)	-54(10)	-09(80)	01(98)	-07(83)	-15(66)
Knee flexion	P	-35(34)	23(51)	16(64)	-10(77)	-14(68)	13(71)	05(87)	14(68)	-52(12)	70(02)*	20(56)	46(17)
	NP	67(03)*	-09(79)	21(54)	-07(83)	31(37)	-18(60)	15(66)	-49(14)	-44(19)	28(42)	-42(21)	06(85)
Knee extension	P	-21(55)	42(21)	-03(93)	-01(98)	10(78)	41(23)	20(57)	-34(33)	-27(43)	21(55)	05(88)	60(06)
	NP	58(07)	-10(77)	43(20)	-13(72)	37(28)	-27(43)	18(61)	-22(53)	-54(10)	47(16)	-38(27)	16(65)
Ankle dorsi.	P	-37(28)	03(92)	-04(90)	-08(81)	-17(62)	-04(89)	-19(58)	04(89)	-46(18)	38(27)	07(84)	14(69)
	NP	28(42)	-23(51)	-03(93)	07(84)	-33(35)	-40(24)	-42(22)	13(71)	15(67)	-27(44)	-65(04)*	-27(44)
Ankle plan.	P	-13(72)	40(24)	-09(82)	03(92)	25(47)	36(29)	-13(71)	-36(30)	-06(86)	-13(70)	-04(90)	47(16)
	NP	22(53)	-24(48)	33(34)	-25(47)	25(47)	-02(95)	05(87)	-24(50)	-36(29)	33(34)	-40(24)	19(58)

Note, * significantly correlated at $p < .05$; paretic [P], non-paretic [NP].

근력 그리고 보행 시 나타나는 CRP 및 CRPv의 기술통계 결과는 <Table 1-3>과 같이 제시되었다.

2. 하지근력과 분절 간 CRP 및 CRPv의 상관관계

본 연구에서 보행 시 뇌졸중 환자의 마비측과 비마비측 하지 근력과 보행 시 나타나는 분절 간의 CRP 및 CRPv의 상관관계를 살펴본 결과, 뇌졸중 환자의 하지근력과 분절 간의 CRP에서는 마비측 발목 관절 배측굴곡근과 대퇴 외/내전-하퇴 외/내전 간의 통계적으로 유의한 정적인 상관관계를 나타냈으며, 비마비측 무릎 관절 굴곡근과 하퇴 외/내회전-발 외/내반 간에는 부적 상관관계를 나타냈다(Table 4, $p < .05$). 그러나, 뇌졸중 환자의 하지근력과 분절 간의 CRPv에서는 하지근력과 모든 분절 간의 CRPv가 통계적으로 유의한 상관관계를 나타내지 않았다(Table 4, $p > .05$).

3. 하지근력과 관절 간 CRP 및 CRPv의 상관관계

본 연구에서 보행 시 뇌졸중 환자의 마비측과 비마비측 하지 근력과 보행 시 나타나는 관절 간의 CRP 및 CRPv의 상관관계를 살펴본 결과, 뇌졸중 환자의 하지근력과 관절 간의 CRP에서는 비마비측 엉덩 관절 굴곡근과 엉덩 관절 외/내전-무릎 관절 외/내회전 간의 통계적으로 유의한 정적인 상관관계를 나타냈으며, 비마비측 무릎 관절 굴곡근과 엉덩 관절 외/내전-무릎 관절 외/내회전은 정적인 상관관계를 나타냈다. 그리고 비마비측 발목 관절 배측굴곡근은 무릎 관절 외/내회전-발목 관절 내/외반과 부적 상관관계를 나타냈다(Table 5, $p < .05$). 또한, 뇌졸중 환자의 하지근력과 관절 간의 CRPv에서는 마비측 무릎 관절 굴곡근과 무릎관절 굴곡/신전-발목관절 외/내반이 통계적으로 유의한 부적상관관계를 나타냈다(Table 5, $p < .05$). 그러나 뇌졸중 환자의 하지근력과 이외 다른 변인들 간에서는 통계적으로 유의한 상관관계는 나타나지 않았다(Table 5, $p > .05$).

IV. 논의

본 연구는 뇌졸중 환자의 하지 근력이 보행 시 하지 내 협응 패턴에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 뇌졸중 환자의 마비측과 비마비측 하지 근력과 하지 내 분절과 관절의 CRP 그리고 CRPv를 살펴보았으며, 그 상관관계를 분석하였다. 본 연구에서는 뇌졸중 환자의 하지근력을 살펴본 기술통계 결과, 마비측의 엉덩 관절, 무릎 관절 및 발목 관절의 굴곡근에 근력이 비마비측보다 약한 경향을 나타냈다. 이는 뇌졸중 환자의 마비측 근력과 비마비측의 근력이 차이가 있음을 나타내며, 결론적으로 비대칭적인 보행 패턴을 유발 하는 원인이 될 수 있음을 뜻한다(Mauritz, 2002). 분절 간의 CRP 및 CRPv는 비마비측에서 낮은 CRP(높은 동조)의 경향을 나타냈고, 마비측이 전반적으로 일관적인 CRPv의 패턴을 나타냈다. 이는 마비측이 불안정적이고 짧은 지지기를 구사하는 것에 비해, 비마비측은 발을 빠르게 들어올려 안정적으로 보

행을 수행하기 위한 움직임을 수행한 것으로, 비마비측이 높은 동조의 움직임을 구사하였음을 나타낼 수 있다. 또한, 마비측의 CRPv는 뇌졸중 발병 후 뇌졸중 환자들이 약화된 하지근력으로 인하여 비정상적이고, 경직된 보행 패턴을 나타낸 것으로 판단해 볼 수 있다. 관절 간의 CRP 및 CRPv는 CRP에서는 각 관절이 상이한 패턴을 나타냈으며, CRPv는 분절간의 협응 패턴과 동일하게 유연하지 못한 협응 패턴을 나타냈다(Chow & Stokic, 2014; Miller, Chang, Baird, Van Emmerik, & Hamill, 2010; Worster, Valvano, & Carollo, 2015). 뇌졸중 환자들에게서 나타나는 이러한 움직임의 변화는 근 약화, 경직 등에 따른 변동으로 여겨지며, 근력과 협응 패턴과의 관계를 규명하는 것은 뇌졸중 환자의 재활에 매우 유용한 정보가 될 수 있을 것이라 판단된다(Chisholm, Perry, & McIlroy, 2011).

본 연구에서는 뇌졸중 환자의 하지 근력이 보행 시 몇몇 하지 내 협응패턴과 통계적으로 유의한 상관관계를 나타냈다. 먼저, 뇌졸중 환자의 마비측 발목 관절의 배측굴곡근과 대퇴 외/내전-하퇴 외/내전 간 CRP는 정적상관관계를 나타냈다(Table 4, $p < .05$). 일반적으로 뇌졸중 환자들은 뇌졸중 발병 후 마비측 발목 관절 배측굴곡근의 기능 부전(malfunction)으로 인해 보행 시 제한적인 움직임을 구사하게 되고, 독립적인 활동이 어렵게 된다(Bohannon, 2007; Bohannon & Walsh, 1991). 본 연구의 결과, 뇌졸중 환자의 마비측 발목 관절의 배측굴곡근 근력이 좋을수록 보행 시 대퇴 외/내전-하퇴 외/내전 간의 CRP가 증가하여, 대비적인 움직임을 나타내는 이조의 협응패턴을 구사함을 확인할 수 있었다. 움직임에 있어서 높은 동조의 협응패턴은 인접한 분절에 해당 분절이 이끌림 현상을 나타내는 것으로 해석 될 수 있으며, 더불어 근골격계의 구조적인 느슨함을 의미 할 수 있다(Noyes, Matthews, Moorar, & Grood, 1983). 즉, 이조의 협응패턴은 환자가 인접한 분절의 움직임에 전적으로 의존하는 것이 아닌, 의도한대로 각 분절의 독립적인 움직임을 구사할 수 있음을 의미할 수 있고, 발목관절의 배측굴곡근이 강할수록 비교적 근골격계가 단단하게 고정될 수 있음을 방증하는 결과일 수 있다. 따라서 뇌졸중 환자의 재활 트레이닝 시 발목 관절의 배측굴곡근 강화는 뇌졸중 환자들이 보행 시 하지의 움직임을 제어하는데 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 뇌졸중 환자의 비마비측 무릎 관절 굴곡근과 하퇴 외/내회전-발 외/내반 간 CRP는 부적상관관계를 나타냈다(Table 4, $p < .05$). 이와 같은 결과를 통해 뇌졸중 환자의 비마비측의 무릎 관절 굴곡근 근력이 좋을수록 보행 시 하퇴 외/내회전-발 외/내반 간의 CRP가 감소함을 나타내며, 이들이 유사한 움직임을 나타내는 동조의 협응패턴을 구사함을 알 수 있다. 뇌졸중 환자들은 뇌졸중 발병 후 마비측 발목 관절 배측굴곡근의 기능 부전(malfunction)으로 인해 보행 시 발뒤꿈치보다 발끝이 먼저 바닥에 닿는 움직임을 수행하게 되고, 마비측 지지기와 비마비측 공중기 시간 감소, 충격 흡수 및 추진 능력의 저하를 경험하게 된다(Kosak & Reding, 2000). 보행에서 나타나는 동조의 협응패턴은 보행의 특성상 충격을 감소시키고, 효과적으로 추진력을 구사하기 위한 울

바른 움직임으로 간주된다. 이는 뇌졸중 환자의 비마비측 무릎 관절의 굴곡근 강화가 과사용으로 인한 하지에 충격을 감소시키는데 도움을 줄 수 있으며, 뇌졸중 환자의 궁극적인 재활 목적인 보행 속도 증가에 기여할 수 있다고 해석될 수 있다.

그리고 비마비측의 엉덩 관절 굴곡근과 무릎 관절 굴곡근은 보행 시 엉덩 관절 외/내전-무릎 관절 외/내회전 간의 CRP와 정적상관관계를 보였다(Table 5, $p < .05$). 이는 뇌졸중환자들의 비마비측의 엉덩 관절과 무릎 관절 근력이 증가할수록 보행 시 이조의 협응패턴을 나타내는 것으로 해석될 수 있다. 뇌졸중 환자들이 비마비측 하지에 의존한 보행 형태를 나타내는 것을 고려해볼 때, 엉덩 관절 외/내전-무릎 관절 외/내회전 간 이조의 협응패턴은 뇌졸중환자들이 균형을 유지하기 위하여 특유의 전략을 통하여 양하지의 자세를 적절하게 제어하고 있음을 의미할 수 있다. 또한, 이는 뇌졸중 환자들의 보행 시 비마비측이 마비측보다 긴 지지기 시간을 가지기 때문에 비마비측의 근력이 좋을 수록 보행 시 움직임에 대한 의존도를 높였기 때문으로 판단된다(Nyberg & Gustafson, 1995). 다시 말해, 뇌졸중환자들은 근력 수준이 높다고 하더라도 움직임의 형태를 변화시키기보단 비마비측에 의존하는 움직임의 형태를 그대로 유지하여 편중시킨 채 자세동요를 최소화하려는 전략을 사용한다는 것을 예측해볼 수 있다(Laufer, Dickstein, Resnik, & Marcovitz, 2000). 그리고 비마비측의 발목 관절 배측굴곡근과 무릎 관절 외/내회전-발목 관절 외/내번 간의 CRP는 부적상관관계를 나타냈다(Table 5, $p < .05$). 본 연구 결과는 비마비측의 발목 관절 배측굴곡근의 근력이 좋을수록 무릎 관절 외/내회전-발목 관절 외/내번 간의 협응패턴은 동조를 나타냄을 의미하며, 앞서 언급한 바와 같이 충격을 감소시키고, 효과적으로 추진하기 위한 협응의 패턴이다. 그러므로 뇌졸중 환자에 보행 시 의존도가 매우 높은 비마비측 발목 관절 배측굴곡근의 근력을 강화한다면, 보행 시 비마비측 하지에 반복적으로 가해지는 충격을 감소시켜 과사용으로 인한 추가적인 보행 장애를 예방할 수 있음은 물론, 보행 속도의 개선을 위한 추진력 향상에 긍정적인 효과를 가져올 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로, 뇌졸중 환자들의 마비측 무릎관절 굴곡근은 무릎관절 굴곡/신전-발목관절 외/내전 간 CRP와 정적상관관계를 나타냈다(Table 5, $p < .05$). 이는 단순히 뇌졸중 환자들의 마비측 무릎 관절 굴곡근이 강할수록 보행 시 무릎관절과 발목관절 간의 다양한 행동 전략을 구사하여 움직임을 수행한다는 것으로 해석될 수 있다(DeLeo, Dierks, Ferber, & Davis, 2004; Miller et al., 2010) 하지만 본 연구에서는 대상자의 특성을 충분히 고려할 필요가 있다. 즉, 뇌졸중 환자들의 특성상 보행 시 단순히 상황에 대처하기 위하여 다양한 움직임을 구사하는 것이 적절한 전략이라고 볼 수는 없다. 또한, 자칫 의도치 않은 움직임이 발생될 시 낙상을 증가시킬 수 있다. 물론, 무릎관절의 굴곡근과 신전근은 뇌졸중환자들의 재활에 있어서 핵심이 되는 근육이다. 때문에 많은 연구에서는 뇌졸중 발병 후 뇌졸중 환자들의 재활을 위한 근력 트레이닝으로써 무릎 관절 굴곡근과 신전근을 선택해왔으며, 이와 같은 근력 트레이닝은 뇌졸중 환자들의 보행에 긍정적인 효과를 가져온다고

제시해왔다(Cramp, Greenwood, Gill, Rothwell, & Scott, 2006; Ouellette et al., 2004; Yang, Wang, Lin, Chu, & Chan, 2006). 그러나 무릎 관절의 근력 향상을 통하여 보행 시 뇌졸중 환자의 협응패턴 향상을 이루고자 한다면, 본 연구의 결과와 같이 기능이 향상됨에 따라 다양한 움직임을 구사할 가능성이 높아지기 때문에 자세 제어를 위한 균형능력 향상 훈련이 추가적으로 구성되어야 할 것으로 사료된다.

결론적으로, 뇌졸중 환자의 마비측 협응패턴은 발목 관절의 근력과 관련이 있으며, 비마비측 협응패턴은 엉덩 관절과 무릎 관절 그리고 발목 관절 근력이 모두 전반적으로 관련이 있음을 나타냈다. 뇌졸중 환자의 마비측은 발목 관절, 특히 배측굴곡근의 근력이 강할수록 구조적으로 강인하게 하지를 제어할 수 있었으며, 비마비측은 무릎 관절의 굴곡근과 발목 관절의 배측굴곡근의 근력이 좋을수록 보행 시 충격 흡수 및 추진력 향상에 있어서 올바른 움직임을 형성함을 나타냈다. 또한, 비마비측 엉덩 관절 굴곡근의 근력이 강할수록 비마비측에 편중된 확고한 전략을 사용하는 것으로 나타났으며, 마비측의 무릎 관절 굴곡근이 강할수록 다양한 전략을 사용한 보행 패턴을 나타냈다. 따라서 본 연구의 결과는 뇌졸중 환자들의 기능적 향상을 위한 근력 트레이닝 시 특정 관절의 협응 패턴을 선택적으로 강화시키고, 재활을 진행함에 있어서 발생할 수 있는 위험요인을 사전에 예측할 수 있는 정량적인 근거를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론 및 제언

본 연구는 뇌졸중 환자들의 하지 근력이 보행 시 하지 내 협응 패턴에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실시되었다. 본 연구 결과, 기술통계 분석에서는 뇌졸중 환자들의 마비측 근력이 비마비측 근력보다 약한 경향을 나타냈으며, 마비측이 전반적으로 경직되어 있는 협응패턴을 나타냈다. 상관관계 분석에서는 마비측 발목 관절의 강한 배측굴곡 근력은 하지를 구조적으로 강하게 지지해주어 원활하게 움직임을 제어할 수 있도록 협응패턴에 긍정적인 영향을 주는 것으로 나타났으며, 비마비측의 무릎 관절 굴곡근과 발목 관절 배측굴곡근은 보행 시 비마비측의 충격흡수 및 추진에 있어서 긍정적인 영향을 미칠 수 있는 가능성을 나타내었다. 그리고, 비마비측 엉덩 관절 굴곡근의 강함은 비마비측의 편향된 보행 전략을 강화시키는 것으로 나타났고, 마비측의 무릎 관절 굴곡근이 강할수록 보행 시 다양한 협응패턴을 형성하는 것으로 나타났다. 따라서 뇌졸중 환자들의 보행을 위한 근력 트레이닝 시 마비측의 경우 발목관절의 기능을 향상에 집중하는 것이 구조적인 강화를 유도할 수 있을 것으로 판단되며, 비마비측의 경우 전반적으로 하지 근력을 향상시키는 것이 충격흡수 및 추진 그리고 편마비로 인하여 많은 역할을 수행해야하는 비마비측 움직임에 힘을 실어줄 것으로 해석될 수 있다. 또한, 마비측 무릎 관절 굴곡근의 강화는 뇌졸중 환자의 움직임에 대한 자신감을 가져올 수 있지만, 과도한 협응패턴의 증가로 인한 낙상에 주의를 기할 필요가 있다고 판단된다.

이와 같은 결과는 향후 뇌졸중 환자의 협응패턴을 강화하기 위한 재활 트레이닝에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 본 연구에서는 운동학적인 변인 만을 통하여 뇌졸중환자들의 움직임의 형태를 살펴보았기 때문에 실제 동작에서의 원인을 간접적으로 유추할 수 밖에 없었다. 그러므로 추후 연구에서는 지면반력기(Force plate) 및 근전도측정장비(Electro-myography [EMG]) 등 다양한 장비들을 활용하여, 운동역학적인 변인들을 함께 살펴볼 필요가 있다고 생각되어진다.

참고문헌

- Barela, J. A., Whittall, J., Black, P., & Clark, J. E. (2000). An examination of constraints affecting the intralimb coordination of hemiparetic gait. *Human movement science*, 19(2), 251-273.
- Bates, B. T., James, S. L., & Osternig, L. R. (1978). Foot function during the support phase of running. *Running*, 3(4), 24-31.
- Biernaskie, J., & Corbett, D. (2001). Enriched rehabilitative training promotes improved forelimb motor function and enhanced dendritic growth after focal ischemic injury. *J Neurosci*, 21(14), 5272-5280.
- Bohannon, R. W. (2007). Muscle strength and muscle training after stroke. *J Rehabil Med*, 39(1), 14-20. doi: 10.2340/16501977-0018
- Bohannon, R. W., & Walsh, S. (1991). Association of paretic lower extremity muscle strength and standing balance with stair-climbing ability in patients with stroke. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 1(3), 129-133. doi: 10.1016/S1052-3057(10)80004-7
- Butefisch, C., Hummelsheim, H., Denzler, P., & Mauritz, K. H. (1995). Repetitive training of isolated movements improves the outcome of motor rehabilitation of the centrally paretic hand. *J Neurol Sci*, 130(1), 59-68. doi: 10.1016/0022-510x(95)00003-k
- Chisholm, A. E., Perry, S. D., & McIlroy, W. E. (2011). Inter-limb centre of pressure symmetry during gait among stroke survivors. *Gait & posture*, 33(2), 238-243.
- Chow, J. W., & Stokic, D. S. (2014). Variability, frequency composition, and complexity of submaximal isometric knee extension force from subacute to chronic stroke. *Neuroscience*, 273, 189-198. doi: 10.1016/j.neuroscience.2014.05.018
- Cramp, M. C., Greenwood, R. J., Gill, M., Rothwell, J. C., & Scott, O. M. (2006). Low intensity strength training for ambulatory stroke patients. *Disabil Rehabil*, 28(13-14), 883-889. doi: 10.1080/09638280500535157
- DeLeo, A. T., Dierks, T. A., Ferber, R., & Davis, I. S. (2004). Lower extremity joint coupling during running: a current update. *Clinical Biomechanics*, 19(10), 983-991.
- Dietz, V., Fouad, K., & Bastiaanse, C. M. (2001). Neuronal coordination of arm and leg movements during human locomotion. *Eur J Neurosci*, 14(11), 1906-1914. doi: 10.1046/j.0953-816x.2001.01813.x
- Dietz, V., Ketelsen, U. P., Berger, W., & Quintern, J. (1986). Motor unit involvement in spastic paresis. Relationship between leg muscle activation and histochemistry. *J Neurol Sci*, 75(1), 89-103. doi: 10.1016/0022-510x(86)90052-3
- Duncan, P. W., Zorowitz, R., Bates, B., Choi, J. Y., Glasberg, J. J., Graham, G. D., . . . Reker, D. (2005). Management of Adult Stroke Rehabilitation Care: a clinical practice guideline. *Stroke*, 36(9), e100-143. doi: 10.1161/01.STR.0000180861.54180.FF
- Eng, J. J., & Chu, K. S. (2002). Reliability and comparison of weight-bearing ability during standing tasks for individuals with chronic stroke. *Arch Phys Med Rehabil*, 83(8), 1138-1144. doi: 10.1053/apmr.2002.33644
- Gracies, J. M. (2005a). Pathophysiology of spastic paresis. I: Paresis and soft tissue changes. *Muscle Nerve*, 31(5), 535-551. doi: 10.1002/mus.20284
- Gracies, J. M. (2005b). Pathophysiology of spastic paresis. II: Emergence of muscle overactivity. *Muscle Nerve*, 31(5), 552-571. doi: 10.1002/mus.20285
- Hamill, J., van Emmerik, R. E., Heiderscheit, B. C., & Li, L. (1999). A dynamical systems approach to lower extremity running injuries. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 14(5), 297-308. doi: 10.1016/s0268-0033(98)90092-4
- Horstman, A. M., Beltman, M. J., Gerrits, K. H., Koppe, P., Janssen, T. W., Elich, P., & de Haan, A. (2008). Intrinsic muscle strength and voluntary activation of both lower limbs and functional performance after stroke. *Clin Physiol Funct Imaging*, 28(4), 251-261. doi: 10.1111/j.1475-097X.2008.00802.x
- Hutin, E., Pradon, D., Barbier, F., Gracies, J.-M., Bussel, B., & Roche, N. (2010). Lower limb coordination in hemiparetic subjects: impact of botulinum toxin injections into rectus femoris. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 24(5), 442-449.
- Hutin, E., Pradon, D., Barbier, F., Gracies, J.-M., Bussel, B., & Roche, N. (2011). Lower limb coordination patterns in hemiparetic gait: factors of knee flexion impairment.

- Kelso, J. A. (1995). *Dynamic patterns*. The self-organization of brain and behavior. MIT press.
- Kosak, M. C., & Reding, M. J. (2000). Comparison of partial body weight-supported treadmill gait training versus aggressive bracing assisted walking post stroke. *Neurorehabil Neural Repair*, 14(1), 13-19. doi: 10.1177/154596830001400102
- Laufer, Y., Dickstein, R., Resnik, S., & Marcovitz, E. (2000). Weight-bearing shifts of hemiparetic and healthy adults upon stepping on stairs of various heights. *Clinical rehabilitation*, 14(2), 125-129.
- Li, L., van den Bogert, E. C., Caldwell, G. E., van Emmerik, R. E., & Hamill, J. (1999). Coordination patterns of walking and running at similar speed and stride frequency. *Human movement science*, 18(1), 67-85.
- Mauritz, K. H. (2002). Gait training in hemiplegia. *Eur J Neurol*, 9 Suppl 1, 23-29; discussion 53-61. doi: 10.1046/j.1468-1331.2002.0090s1023.x
- Miller, R. H., Chang, R., Baird, J. L., Van Emmerik, R. E., & Hamill, J. (2010). Variability in kinematic coupling assessed by vector coding and continuous relative phase. *J Biomech*, 43(13), 2554-2560. doi: 10.1016/j.jbiomech.2010.05.014
- Noyes, F. R., Matthews, D. S., Mooar, P. A., & Grood, E. S. (1983). The symptomatic anterior cruciate-deficient knee. Part II: the results of rehabilitation, activity modification, and counseling on functional disability. *J Bone Joint Surg Am*, 65(2), 163-174. doi: 10.2106/00004623-198365020-00004
- Nyberg, L., & Gustafson, Y. (1995). Patient falls in stroke rehabilitation. A challenge to rehabilitation strategies. *Stroke*, 26(5), 838-842. doi: 10.1161/01.str.26.5.838
- Ouellette, M. M., LeBrasseur, N. K., Bean, J. F., Phillips, E., Stein, J., Frontera, W. R., & Fielding, R. A. (2004). High-intensity resistance training improves muscle strength, self-reported function, and disability in long-term stroke survivors. *Stroke*, 35(6), 1404-1409. doi: 10.1161/01.STR.0000127785.73065.34
- Prange, G. B., Jannink, M. J., Groothuis-Oudshoorn, C. G., Hermens, H. J., & IJzerman, M. J. (2006). Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke. *J Rehabil Res Dev*, 43(2), 171-184. doi: 10.1682/jrrd.2005.04.0076
- Sackley, C. M. (1991). Falls, sway, and symmetry of weight-bearing after stroke. *Int Disabil Stud*, 13(1), 1-4. doi: 10.3109/03790799109166267
- Saunders, D. H., Sanderson M., Hayes S., Kilrane, M., Greig, C. A., Brazzelli, M., Mead, G. E. (2016). Physical Fitness Training for Patients with Stroke. *Stroke*, 47(9), e219-e220.
- Stergiou, N., Giakas, G., Byrne, J. B., & Pomeroy, V. (2002). Frequency domain characteristics of ground reaction forces during walking of young and elderly females. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 17(8), 615-617. doi: 10.1016/s0268-0033(02)00072-4
- Snow, L. M., Low, W. C., & Thompson, L. V. (2012). Skeletal muscle plasticity after hemorrhagic stroke in rats: influence of spontaneous physical activity. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 91(11), 965-976.
- van Emmerik, R. E., & Wagenaar, R. C. (1996). Effects of walking velocity on relative phase dynamics in the trunk in human walking. *J Biomech*, 29(9), 1175-1184. doi: 10.1016/0021-9290(95)00128-x
- Worster, K., Valvano, J., & Carollo, J. J. (2015). Sagittal plane coordination dynamics of typically developing gait. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 30(4), 366-372. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2015.02.013
- Yang, Y. R., Wang, R. Y., Lin, K. H., Chu, M. Y., & Chan, R. C. (2006). Task-oriented progressive resistance strength training improves muscle strength and functional performance in individuals with stroke. *Clin Rehabil*, 20(10), 860-870. doi: 10.1177/0269215506070701