하지 화상 환자의 재활치료를 위한 보행보조 로봇훈련의 선행연구

조윤수 · 노민혜 · 주소영 · 서정훈

한림대학교 한강성심병원 재활의학과

The Pilot Study of Robot-Assisted Training for the Lower Extremity Rehabilitation of Burn Patients

Yoon Soo Cho, M.D., Min Hye Noh, P.T., So Young Joo, M.D. and Cheong Hoon Seo, M.D.

Department of Rehabilitation Medicine, Hangang Sacred Heart Hospital, College of Medicine, Hallym University, Seoul, Korea

Purpose: Scar contracture influence the outcome of burn patients significantly. This study aims to investigate the feasibility of robot-assisted training for the lower extremity rehabilitation of burn patients.

Methods: This pilot study was conducted on 7 burn patients for 8 weeks between January 2019 and November 2019. Two of 7 patients withdrew from this study because one had skin abrasion on the legs which thigh fastening devices were applied on and the other was not participate in the assessment at 4 weeks after training. Final 5 patients received gait training with SUBAR® and numeric rating scale (NRS), 6-minutes walking test, and range of motion in flexion and extension of knee and ankle joint were evaluated before training, 4 weeks and 12 weeks after training.

Results: The subjects had a mean age of 51.8 ± 9.8 years, mean total burn surface area of $30.8 \pm 13.7\%$, mean duration from injury to 1st assessment of 102.8 ± 39.3 days. Anyone of 5 patients did not have musculoskeletal or cardiovascular side effects such as increased or decreased blood pressure or dizziness. The significant improvement in NRS, gait speed, and range of motion in knee extension and ankle plantarflexion after robotic training (all $P < 0.05$).

Conclusion: Robot-assisted training could be feasible for the rehabilitation of burn patients and it could improve muscle strength and range of motion in lower extremities, and gait function. (**J Korean Burn Soc 2020;23:31-36**)

Key Words: Robot-assisted training, Rehabilitation, Scar contracture, Burns

서 론

화상 후 흉터 구축은 과도한 흉터 생성과 지속적인 흉터

접수일: 2020. 5. 19, 수정일: 2020. 6. 16, 승인일: 2020. 6. 23

책임저자 : 주소영, 서울시 영등포구 버드나루로 7길 12

☎ 07247, 한림대학교 한강성심병원 재활의학과

Tel: 02-2639-5738, Fax: 02-2633-7571

E-mail: anyany98@naver.com

서정훈, 서울시 영등포구 버드나루로 7길 12

☎ 07247, 한림대학교 한강성심병원 재활의학과

Tel: 02-2639-5738, Fax: 02-2633-7571

E-mail: chseomd@gmail.com

두 저자는 교신저자로서 본 연구에 동등하게 공헌하였습니다.

This work was supported by Market Creation Robot Supply Project 2018 through the Ministry of Trade, Industry and Energy of the Republic of Korea and Korea institute for robot industry advancement (Medical & Rehabilitation Robot Pilot Program 2018).

수축의 병리학적 결과이며[1], 관절 가동범위의 감소를 야기하여 일상적 활동 수행 및 보행 기능에 제한을 야기할 수 있다[1,2]. 화상으로 입원치료를 받은 어린이와 청소년을 대상으로 한 연구에서 흉터 구축으로 인한 기능 제한은 퇴원 후 6개월에도 지속되었으며[2], 화상체표면적 50% 이상을 가진 중증 화상환자의 93.5%에서 수상 1달째 적어도 1부위 이상의 관절 구축이 발생하였다[3]. 중증 화상에 대한 내과적, 외과적 치료 방법의 발전으로 인해 화상 환자 생존율의 증가를 보이고 있으며[4], 이로 인해 흉터 구축을 가진 화상 생존자의 수도 늘어나 퇴원 시 흉터 구축의 유병율이 38~54%에 달하고 있다[1]. 중증 화상환자의 생존율 증가에 따라, 화상 치료에서 주요 관심사 또한 생명을 구하는 부분에서 기능과 사회 복귀 같은 재활 문제로 옮겨가고 있는 중이다[3]. 흉터 구축은 화상 중증도 정도, 재활 치료 시간과 함께 화상 환자의 치료결과에 의미 있는 영향을 미친다[5].

화상 재활의 주요 목적은 운동범위 및 기능 제한을 야기

하는 화상 흉터 구축의 생성을 막는 데 있으며, 화상 입원 치료 기간 동안 시행된 적절하고 충분한 재활치료는 화상 생존자들에게 흉터 구축의 생성을 지연시킬 수 있었다[6]. 하지의 화상 흉터 구축으로 인해 보행 장애를 보이는 화상 환자들에게 시행되는 고전적인 재활치료 방법에는 단절된 동작의 수동적 관절 가동 훈련, 보행 보조기를 이용한 보행 훈련, 물리치료사에 의한 도수 치료들이 있다[7]. 재활치료에 관한 최신 지견에서 환자가 목표한 동작과 비슷한 동작을 집중 반복 훈련함으로써 운동 기술을 익히게 된다는 운동학습이론이 강조되고 있으며[8,9], 이러한 운동학습이론에 근거한 치료방법이 고전적 운동치료보다 더 효과적이라고 보고되고 있다[10,11]. 이에 따라, 하지 보행장애를 가진 환자들에게 숙련된 물리치료사들에 의해 정상 보행 동작을 집중적으로 반복하는 훈련이 시행되고 있으며, 동시적으로 치료사의 육체적 노력과 시간을 줄이고 보행 운동학의 반복적 재연성을 개선하기 위해 보행 훈련을 보조해주는 로봇 장치들의 개발이 최근 활발히 이루어지고 있다[12-16]. 이들 보행 보조 로봇 장치는 정상 생리적 보행 패턴에 따라 환자의 하지 움직임을 유도하도록 미리 프로그램 되어 있으며, 뇌졸중[12], 척수손상[13], 파킨슨병[14] 등 중추 신경계 손상 환자들과 슬관절 혹은 고관절 치환술을 받은 환자들에게[15,16] 임상적 긍정적 효과가 있음이 보고되고 있다. 재활 치료 분야에서 로봇 기술의 확대에도 불구하고, 화상 재활분야에서 화상 치료 중 야기되는 통증 조절에 컴퓨터를 이용한 가상현실 적용 사례들을[17,18] 제외하고는 현재까지 의료용 보행보조 재활로봇의 화상재활치료 적용이 국내에 보고된 바가 거의 없다. 본 연구에서 하지의 화상 흉터 구축으로 인해 관절 가동 범위의 제한과 보행 장애를 보이고 있는 화상 환자의 재활치료에 보행보조 재활로봇을 적용하여 임상적 안정성 및 유용성을 살펴보고자 한다.

대상 및 방법

2019년 1월부터 11월까지 본원 재활의학과에 입원 중인 화상 환자 중 양측 하지에 화상 흉터 구축으로 인한 운동제한과 보행장애를 보이는 환자를 대상으로 보행보조 로봇훈련의 임상적 적용 가능성을 알아보기 위한 선행 연구를 시행하였다. 양측 하지에 흉터 구축으로 인한 운동제한과 보행장애를 보이는 화상 환자 7명이 연구에 등록되었으며, 환자들은 모두 화상 수상 후 무균처치나 피부 이식수술로 상처의 완전한 표피 재형성이 이루어진 환자들이었다[19]. 몸무게 100 kg 이상, 키 150 cm 미만 혹은 185 cm 이상으로 로봇 착용에 적합하지 않은 신체적 조건을 가진 환자, 흉터 부위 출혈이 있거나 로봇 착용시 표피 손상 위험성이 있는

반흔이 있는 환자, 조절되지 않은 고혈압이나 기립성 저혈압이 있는 환자, 인지력 저하 혹은 상지의 장애로 로봇 조절이 어려운 환자, 중등도 이상의 관절 질환을 가진 환자, 골절과 같은 하지 체중 부하의 금기증이 있는 환자는 제외되었다[20]. 대상 환자들은 로봇훈련 기간 동안 흉터 관리제품-실리콘, 압박옷, 보습제 등 적용, 통증 및 가려움증에 대한 약물복용을 시행 받았다. 본 연구는 생명윤리위원회의 승인을 받았으며(HG 2019-004), 연구 대상자들은 피험자 설명서 내용을 듣고 동의서에 서명 후 자발적으로 참여하였다.

보행보조 재활로봇 SUBAR® (CRETEM Co. Ltd, Anyang-si, South Korea)를 사용하여 보행훈련을 받았다. SUBAR®는 다리를 지지해주는 외골격과 보행을 도와주는 운전장치로 구성되어 있으며, 환자가 외골격을 다리에 착용하고 로봇의 힘을 빌려서 걷는 방식이다(Fig. 1). 로봇 적용 보행훈련 시작 전에 먼저 환자의 엉덩이관절 부위에서 무릎까지, 무릎에서 발까지 길이를 재서 환자의 하지 길이에 따라 SUBAR®의 다리 외골격을 조정한다. 다음 단계로 SUBAR®의 외골격에 환자의 양쪽 다리를 넣고 허벅지와 아랫다리를 단단히 고정한다. 보행 속도는 환자의 보행장애 정도에 따라 1부터 5까지 5단계로 조절 가능하며, 무릎 관절 가동 범위에 따라 25도부터 60도까지 5단계로 환자에게 맞추어 적절하게 조절한다. 각 단계는 환자의 근력, 관절운동각도의 호전에 따라 점진적으로 조절되었다. 모든 데이터는 태블릿 PC에 설치된 프로그램에 자동으로 저장되며, SUBAR® 운전은 환자에 의해 직접 이루어지거나 환자 안전을 위해 원격으로 치료사에 의해서도 조절 가능하도록 제작되었다. 보행 훈련은 제자리 보행, 정 보행, 역 보행 3가지 방식으로

Fig. 1. Robot-assisted gait training with SUBAR®.

1회 30분씩, 하루 1회, 주 5회, 8주 동안 치료군에게 시행하였다.

치료 효과에 대한 평가는 훈련 전, 훈련 후 4주와 8주에 실시되었으며, 통증 숫자평가척도(numeric rating scale, NRS), 평지에서 6분 동안 보행한 거리를 측정한 6분 보행검사[21], 고관절, 슬관절, 족관절의 굴곡 및 신전 운동범위가 보행보조 로봇치료 효과를 평가하기 위해 사용되었다. 물리치료사는 6분 보행 평가 동안 환자 곁에서 함께 이동하였으며 필요한 경우 약간의 도움을 제공하였고, 2번 시도에서 더 빠른 수치가 분석에 포함되었다. 운동각도와 근력은 흉터 구축을 보이는 관절이 평가에 포함되었으며, 가동운동범위 측정은 휴대용 각도계(goniometer)를 사용하였다.

훈련 전, 훈련 후 4주와 8주에 호전 유무를 알아보기 위해 먼저 각 기간의 평가점수 평균들을 Frideman test를 사용하여 비교 분석한 후 유의한 경우 Dunnett T3 post hoc test로 사후검정을 시행하여 비교하였고, 다음으로 훈련 전과 훈련 후 4주, 훈련 후 8주의 평가점수 차이를 계산한 기간들 사이의 변화량 평균을 Wilcoxon signed rank sum test를 사용하여 비교하였다. 통계 분석을 위해 SPSS version 21 (International Business Machines Corporation, Chicago, USA)이 사용되었으며 통계적 유의수준은 $P < 0.05$ 로 하였다.

결 과

환자 선정 기준에 부합하는 7명의 화상환자가 연구에 등록되었으며, 이들 중 1명은 고정 belt 착용 부위에서 피부 벗겨짐이 발생하여 중단하였고 1명은 훈련 후 4주의 임상 평가를 받지 않아 제외되어 최종적으로 5명이 8주까지 연구에 참여하였다(Table 1). 참여자들은 평균 나이 51.8 ± 9.8 세, 평균 신장 163.0 ± 8.2 cm, 평균 체중 66.6 ± 5.7 kg, 화원화상 2명, 열탕화상 1명, 전기화상 1명, 평균 화상체표면적 $30.8 \pm 13.7\%$, 평균 수상 후부터 로봇 보행훈련 시작까지 걸린 기간 102.8 ± 39.3 일이었으며, 관절구축 부위는 대퇴부 10군데, 무릎 10군데, 발목 9군데였다(Table 2). 참가자 중 근골격계 부작용이나 현기증, 혈압 상승이나 저하 등 심혈관계 부작용이 발생된 사례는 없었으며 통증 및 가려움에 대한 약물 복용을 시행한 환자에서 약물 종류 및 용량의 변화는 없었다.

Table 3은 훈련 전, 훈련 후 4주, 훈련 후 8주에 시행한 평가점수의 평균을 보여준다. 로봇 보행훈련 전과 비교하여 훈련 후 4주, 8주에 통증 숫자평가척도가 8.4 ± 0.8 점에서 5.2 ± 0.8 점, 4.6 ± 0.5 점으로 유의하게 감소되었으며($P < 0.001$) 보행속도, 무릎 신전 및 발목 저축 굴곡 가동범위가 훈련

Table 1. Clinical Characteristics of Enrolled Patients

Case No.	Sex	Age (years)	Burn type	TBSA (%)	Duration since burn injury (days)	Joint with LOM	Training	Duration of training (weeks)	Adverse events
1	F	41	SB	13	76	Both H, K, A	Robot + conventional PTx	8	Nothing
2	M	64	FB	41	173	Both H, K, A	Dropout (personal cause)	4	Nothing
3	M	66	FB	17	115	Both H, K, Right A	Robot + conventional PTx	8	Nothing
4	M	45	FB	42	76	Both H, K, A	Robot + conventional PTx	8	Nothing
5	M	59	FB	41	76	Both H, K, A	Robot + conventional PTx	8	Nothing
6	M	48	EB	41	171	Both H, K, A	Robot + conventional PTx	8	Nothing
7	M	64	SB	40	56	Both H, K	Dropout (skin abrasion)	2	Abrasion

TBSA = total body surface area, LOM = limitation of motion, SB = scalding burn, FB = flame burn, EB = electrical burn, H = hip, K = knee, A = ankle, PTx = physical therapy.

후에 유의하게 증가하였다(all $P < 0.05$). 사후검정에서 통증 숫자평가척도, 보행속도, 발목 저축 굴곡 가동범위가 로봇 보행훈련 후 4주 평가에 유의한 호전을 보였으며(all $P < 0.05$) 훈련 후 4주와 8주 평가점수 평균 사이에는 유의한 차이는 없었다(all $P > 0.05$). 무릎 신전 가동범위는 훈련 전 $-7.8 \pm 7.9^\circ$ 에서 훈련 후 4주 $-0.8 \pm 1.7^\circ$, 훈련 후 8주 $-0.4 \pm 0.9^\circ$ 로 8주 동안 지속적으로 꾸준히 유의한 호전을 보였다($P = 0.034$).

각 평가 기간들 사이의 변화량 평균 비교는 Table 4에서 보여준다. 통증 숫자평가척도, 보행 속도, 발목 배측 및 저축 굴곡의 가동범위의 변화량은 훈련 전부터 훈련 4주 사이(-3.2 ± 0.8 점, 0.3 ± 0.1 m/sec, $5.7 \pm 7.6^\circ$, $14.5 \pm 12.2^\circ$)에 훈련 후 4주에서 8주 사이(-0.6 ± 0.5 점, 0.1 ± 0.1 m/sec, $-4.1 \pm 8.7^\circ$, $3.7 \pm 7.8^\circ$)보다 유의하게 더 큰 값을 보였다(all $P < 0.05$). 발목 배측 가동범위는 훈련 초기 4주의 양의(positive) 변화와 달리 훈련 후 4주와 8주 사이에 유의한 음의(negative)

변화량을 보였다($P = 0.006$).

고 찰

본 연구는 하지에 화상 수상 후 흉터 수축으로 인한 관절 가동범위 제한과 보행 장애를 보이는 화상환자의 재활치료에 보행보조 로봇의 적용 가능성을 살펴본 선행연구이다. 보행보조 재활로봇 SUBAR®는 다리를 지지해주는 외골격과 보행을 도와주는 운전장치로 구성되어 있어 보행훈련시 기존의 숙련된 물리치료사에 의한 재활치료보다 낙상 위험을 감소시킬 수 있을 것이다. 화상환자들은 상처 치유 동안 뿐 아니라 재활치료 중에도 치료적 술기들에 의해 통증의 악화를 경험하게 되며[22], 흉터 통증의 35%가 1년 이상 지속된다고 알려져 있다[23]. 특히 하지 관절 주위의 흉터 통증은 상처의 재상피화 후에도 관절 가동범위에 제한을 야기하고 보행 속도를 감소시킴으로써 화상 환자들의 보행 기능 회복에 영향을 미칠 수 있다. 우리는 숫자평가척도를

Table 2. Demographics Characteristics of Five Patients with Robotic Training for 8 Weeks

Sex (male/female)	4:1
Age (years)	51.8±9.8
Height (cm)	163.0±8.2
Weight (kg)	66.6±5.7
Body mass index (kg/m ²)	25.1±1.6
Burn type (FB:SB:EB)	3:1:1
Percent of TBSA (%)	30.8±13.7
Duration since burn injury (days)	102.8±39.3
Joint of LOM (H:K:A)	10:10:9

Data for continuous variables are expressed as mean±standard deviation.

FB = flame burn, SB = scalding burn, EB = electrical burn, TBSA = total body surface area, LOM = limitation of motion, H = hip, K = knee, A = ankle.

Table 4. Comparisons of Improvement in Parameters among Three Assessments

	Pre ~ 4 weeks	4 weeks ~ 8 weeks	P-value
Pain NRS	-3.2 ± 0.8	-0.6 ± 0.5	0.002
Speed (m/sec)	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.021
ROM of joint (°)			
Knee flexion	10.8 ± 20.5	1.3 ± 3.2	0.250
Knee extension	6.3 ± 7.3	6.6 ± 7.8	1.000
Ankle dorsiflexion	5.7 ± 7.6	-4.1 ± 8.7	0.006
Ankle plantarflexion	14.5 ± 12.2	3.7 ± 7.8	0.013

Wilcoxon signed rank sumtest was used for analysis.
NRS = numeric rating scale, ROM = range of motion.
 $P < 0.05$.

Table 3. Comparisons of Descriptive Parameters at before Training, 4 Weeks and 8 Weeks after Robotic Training

	Before	4 weeks	8 weeks	P-value
Pain NRS	8.4 ± 0.8^{ab}	5.2 ± 0.8^a	4.6 ± 0.5^b	< 0.001
Speed (m/sec)	0.3 ± 0.03^{ab}	0.6 ± 0.09^a	0.7 ± 0.10^b	< 0.001
ROM of joint (°)				
Knee flexion	96.7 ± 17.1	108.7 ± 15.7	110.1 ± 15.5	0.258
Knee extension	-7.8 ± 7.9^a	-0.8 ± 1.7^b	-0.4 ± 0.9^c	0.034
Ankle dorsiflexion	16.1 ± 7.4	22.4 ± 4.9	17.9 ± 4.4	0.062
Ankle plantarflexion	17.6 ± 3.5^{ab}	33.7 ± 12.6^a	37.8 ± 4.4^b	< 0.001

Statistical significance was evaluated using Friedman test with Dunnett T3 post hoc test.

The same alphabets indicate significant difference between groups ($P = 0.05$) on post hoc test.

NRS = numeric rating scale, ROM = range of motion.

$P < 0.05$.

사용하여 통증 강도를 측정하였으며, 훈련 후 8주까지 지속적인 흉터 통증의 감소를 보였다. 특히, 훈련 초기 4주 동안에 훈련 후반 4주보다 유의하게 더 큰 통증 감소를 보였다. 무릎 관절 전치환술 환자의 초기 재활치료에서 로봇 적용 재활훈련은 고식적 재활훈련보다 수술 후 초기 통증 감소에 유의하게 더 큰 효과가 있었다고 보고되고 있다[24,25]. 일정 속도와 일정 각도로 무릎 관절 움직임이 이루어지도록 프로그램화된 로봇 보행훈련의 적용은 하지 화상 환자의 재활치료에서 재활 술기로 인해 야기될 수 있는 통증 감소에 효과가 있을 것으로 추정된다.

화상 흉터는 특징적으로 수상 후 6개월에서 12개월 정도 까지, 때때로 24개월 이상 지속되기도 하는, 병적인 과증식을 보이게 된다[2]. 본 선행연구 대상자들은 수상 후부터 평균 102.8 ± 39.3 일에 로봇 보행훈련을 시작하였으므로, 이런 과증식 과정이 훈련 동안 지속적으로 진행되었을 것이다. 통증 숫자평가척도, 보행 속도, 발목 배측 및 저측 굴곡의 가동범위의 훈련 후 4주부터 8주 사이의 변화 정도가 훈련 시작부터 4주 사이 호전된 정도와 비교하여 통계학적으로 유의하게 감소된 효과를 보였던 것은 흉터 과증식의 진행 때문인 것으로 추측된다. 하지만 로봇 훈련 자체가 흉터 과증식을 촉진하는 요인으로 작용했을 수도 있다. 따라서, 추후 대조군 연구를 통해 로봇 훈련이 흉터 과증식에 영향을 미칠 가능성을 배제하기 위한 추가 연구가 필요할 것이다.

재활훈련으로 인한 보행기능 회복을 측정하는 지표로써 6분 보행 검사를 시행하여 보행 속도를 측정하였다. 보행 속도는 보행 기능 회복을 반영하는 타당성 높은 지표이며, 보행 속도의 변화를 통해 재활치료의 효과를 판정할 수 있다[26]. 로봇 보행훈련 후 4주와 8주에 보행속도가 꾸준히 호전되었으나, 훈련 초기 4주 동안에 훈련 후반 4주보다 보행 속도의 호전 정도가 유의하게 더 증가하였다. 보행 속도의 변화와 흉터 통증의 변화가 유사한 양상을 보이고 있는 것으로 보아 흉터 통증 감소 및 증가가 하지 화상환자의 보행 속도 회복에 영향을 미칠 수 있었을 것으로 추정된다.

하지 관절 가동범위 평가 항목에서 훈련 후 8주 동안 무릎 신전 가동범위의 꾸준한 호전이 있었고, 발목 저측 굴곡 가동범위는 훈련 초기 4주 동안 훈련 후반 4주보다 유의하게 증가되었다. 신전 지연(extension lag)은 무릎 신전의 능동 가동범위가 수동 가동범위보다 적은 상태를 뜻하며 무릎 외상이나 수술 후에 흔히 관찰된다[27]. 대퇴사두근의 약화와 관련 있다고 알려져 있는데[24,27], 로봇보조 보행훈련은 무릎 능동 운동에 보조적 작용을 통해 보행 중에 생기는 신전 지연(extension lag)을 향상시킴으로써 보행 기능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 뇌졸중 환자[12,20], 무릎관절 전치환술 시행 받은 환자[24,25]에 로봇 보행훈련

후 하지 보행 기능에 유의한 호전을 보였음이 보고되었다. 로봇 적용을 통한 반복적이고 자발적인 보행 동작이 뇌피질에서 감각 및 운동 자극에 대한 피드백을 유발하고 이를 통해 관절 움직임과 근력의 호전을 야기할 수 있을 것이다 [13,24].

본 연구는 무작위 대조군 연구가 아니고 대상 환자수가 적었으며, 통증 감소에 미치는 외부적 요인들의 영향을 완전히 배제하지 못했다는 제한점을 가진다. 하지만, 중재 과정 및 효과 평가 항목들이 타당성 있게 시행됨으로써 후속 연구를 위한 선행 연구로 충분한 의미를 지니고 있다. 화상 수상 후 56일째인 환자에게 로봇 고정 belt 적용부위에 피부 찰과상이 생겨 훈련을 중단한 사례가 1명 있었으나, 추후 연구에서 흉터가 더 안정화된 후 로봇 훈련을 시행함으로써 해결될 수 있을 것이다. 그 외에 로봇 훈련 중 어떤 근골격계 부작용이나 심혈관계 부작용도 발생하지 않았다. Belt로 인한 피부 자극이 없도록 추가적인 재질 개선과 흉터 특성을 고려한 최적의 로봇 적용 시기에 대한 추가적 연구가 필요할 것이다.

결론

보행 장애를 가진 하지 화상 환자에게 로봇 보행훈련은 안전하다고 고려될 수 있으며, 고식적 보행훈련에 비해 통증 감소, 보행 속도 증가, 하지 가동범위 향상에 더 나은 결과를 가져다 줄 수 있을 것이다. 따라서, 보행보조 재활로봇의 적용은 하지 화상 환자에게 하지 운동기능과 보행기능 회복을 위한 새로운 치료적 가능성을 제시할 수 있을 것으로 기대되며 추가적 대조군 연구가 시행되어야 할 것이다.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors have no competing interest to declare.

REFERENCES

1. Oosterwijk AM, Mouton LJ, Schouten H, Disseldorp LM, van der Schans CP, Nieuwenhuis MK. Prevalence of scar contractures after burn: a systematic review. *Burns* 2017;43:41-9.
2. Oosterwijk AM, Mouton LJ, Akkerman M, Stoop MM, van Baar ME, Scholten-Jaegers SMH, et al. Course of prevalence of scar contractures limiting function: A preliminary study in children and adolescents after burns. *Burns* 2019;45: 1810-18.
3. Tan J, Chen J, Zhou J, Song H, Deng H, Ao M, et al. Joint contractures in severe burn patients with early rehabilitation intervention in one of the largest burn intensive care units

- in China: a descriptive analysis. *Burns Trauma* 2019;7:17.
4. Richard R, Baryza MJ, Carr JA, Dewey WS, Dougherty ME, Forbes-Duchart L, et al. Burn rehabilitation and research: proceedings of a consensus summit. *J Burn Care Res* 2009;0: 543-73.
  5. Richard R, Santos-Lozada AR. Burn patient acuity demographics, scar contractures and rehabilitation treatment time related to patient outcomes: the ACT study. *J Burn Care Res* 2017;38:230-42.
  6. Richard R, Santos-Lozada AR, Dewey WS, Chung KK. Profile of patients without burn scar contracture development. *J Burn Care Res* 2017;38:e62-e69.
  7. Esselman PC. Burn rehabilitation: an overview. *Arch Phys Med Rehab* 2007;88:S3-S6.
  8. Van Peppen RP, Kwakkel G, Wood-Dauphinee S, Hendriks HJ, Van der Wees PJ, Dekker J. The impact of physical therapy on functional outcomes after stroke: what's the evidence? *Clin Rehabil* 2004;18:833-62.
  9. Bayona NA, Bitensky J, Salter K, Teasell R. The role of task-specific training in rehabilitation therapies. *Top Stroke Rehabil* 2005;12:58-65.
  10. Langhammer B, Stanghelle JK. Bobath or motor relearning program? A comparison of two different approaches of physiotherapy in stroke rehabilitation: a randomized controlled study. *Clin Rehabil* 2000;14:361-9.
  11. Richards CL, Malouin F, Wood-Dauphinee S, Williams JL, Bouchard JP, Brunet D. Task-specific physical therapy for optimization of gait recovery in acute stroke patients. *Arch Phys Med Rehab* 1993;74:612-20.
  12. Nilsson A, Vreede KS, Häglund V, Kawamoto H, Sankai Y, Borg J. Gait training early after stroke with a new exoskeleton – the hybrid assistive limb: a study of safety and feasibility. *J Neuroeng Rehabil* 2014;11:92.
  13. Sczesny-Kaiser M, Hoffken O, Aach M, Cruciger O, Grasmucke D, Meindl R, et al. HALI exoskeleton training improves walking parameters and normalizes cortical excitability in primary somatosensory cortex in spinal cord injury patients. *J Neuroeng Rehabil* 2015;12:68.
  14. Galli M, Cimolin V, De Pandis MF, Le Pera D, Sova I, Albertini G, et al. Robot-assisted gait training versus treadmill training in patients with Parkinson's disease: a kinematic evaluation with gait profile score. *Funct Neurol* 2016;31:163.
  15. Li J, Wu T, Xu Z, Gu X. A pilot study of post-total knee replacement gait rehabilitation using lower limbs robot-assisted training system. *Eur J Orthop Surg Tr* 2014;24:203-8.
  16. Setoguchi D, Kinoshita K, Kamada S, Sakamoto T, Kise N, Kotani N, et al. Hybrid Assistive Limb improves restricted hip extension after total hip arthroplasty. *Assist Technol* 2020 (just-accepted).
  17. Hoffman HG, Patterson DR, Carrougner GJ. Use of virtual reality for adjunctive treatment of adult burn pain during physical therapy: a controlled study. *Clin J Pain* 2000;16: 244-50.
  18. Sharar SR, Miller W, Teeley A, Soltani M, Hoffman HG, Jensen MP, et al. Applications of virtual reality for pain management in burn-injured patients. *Expert Rev Neurother* 2008;8:1667-74.
  19. Cho YS, Lee J, Joo SY, Seo CH. Crosstalk among adipose tissue, vitamin D level, and biomechanical properties of hypertrophic burn scars. *Burns* 2019;45:1430-37.
  20. Jung KH, Ha H, Shin HJ, Ohn SH, sung DH, Lee P, et al. Effects of robot-assisted gait therapy on locomotor recovery in stroke patients. *J Korean Acad Rehabil Med* 2008;32:258-66.
  21. Bohannon RW, Crouch R. Minimal clinically important difference for change in 6-minute walk test distance of adults with pathology: a systematic review. *J Eval Clin Pract* 2017;23: 377-81.
  22. Raymond I, Nielsen TA, Lavinge G, et al. Quality of sleep and its daily relationship to pain intensity in hospitalized adult burn patients. *Pain* 2001;92:391-8.
  23. Choinie M, Melzack R, Papillon J. Pain and paresthesia in patients with healed burns: an exploratory study. *J Pain Symptom Manage* 1991;6:437-44.
  24. Yoshikawa K, Mutsuzaki H, Sano A, Koseki K, Fukaya T, Mizukami M, et al. Training with hybrid assistive limb for walking function after total knee arthroplasty. *J Orthop Surg Res* 2018;13:163.
  25. Tanaka Y, Oka H, Nakayama S, Ueno T, Matsudaira K, Miura T, et al. Improvement of walking ability during postoperative rehabilitation with the hybrid assistive limb after total knee arthroplasty: a randomized controlled study. *SAGE Open Medicine* 2017;5:2050312117712888.
  26. Barthuly AM, Bohannon RW, Gorack W. Gait speed is a responsive measure of physical performance for patients undergoing short-term rehabilitation. *Gait Posture* 2012;36:61-4.
  27. Sprague RB. Factors related to extension lag at the knee joint. *J Orthop Sport Phys* 1982;3:178-82.