



편측 대퇴절단자의 의지보행훈련 종료 후 보행특성 변화: 1년 후 추적 연구

Changes in Gait Characteristics after Completion of Prosthetic Gait Training in Patients with Unilateral Transfemoral Amputation: Follow-Up after 1 Year

정보라¹, 김규석¹, 장윤희^{1,#}
Bo Ra Jeong¹, Gyoo Suk Kim¹, and Yun Hee Chang^{1,#}

¹ 근로복지공단 재활공학연구소 (Rehabilitation Engineering Research Institute, Korea Workers' Compensation & Welfare Service)
Corresponding Author / E-mail: yhchang2@comwel.or.kr, TEL: +82-32-509-5249
ORCID: 0000-0002-8481-1227

KEYWORDS: Prosthetic gait training (의지보행훈련), Transfemoral amputation (대퇴절단), Gait analysis (보행분석), Lower limb coordination (하지 협응), Continuous relative phase (연속상대위상)

There are no known studies on the changes in walking ability in patients with transfemoral amputations returning to daily activities after prosthetic gait training. The ability to walk after discharge may vary depending on an individual's physical, psychological, and social factors. This study compared spatiotemporal variables and lower limb coordination ability at the end of training and one year after the end of training in seven unilateral transfemoral amputees and analyzed the factors affecting walking ability. The study results confirmed that there was no significant difference in spatiotemporal parameters such as walking speed and lower limb coordination ability after one year of training, and walking ability was well maintained after training. Five out of seven (71.4%) participants in this study returned to work, and there was a strong correlation between employment and gait improvement ($r = 0.806, p < .05$). In conclusion, activities such as social participation, employment, and exercise were very important factors in maintaining and improving an individual's walking ability. The findings are intended to be used as basic data to provide guidelines for maintaining the health of lower limb amputees.

Manuscript received: May 26, 2022 / Revised: July 7, 2022 / Accepted: July 12, 2022

1. 서론

사고나 질병으로 하지를 절단한 사람들은 절단 수술 후 의지(Prosthetics)를 착용하고 보행하게 된다. 입원기간 동안 다양한 재활훈련을 통해 의지보행이 가능해졌지만, 대부분 재활훈련이 종료된 후에도 절단 전 보행 수준까지 완전히 회복되기는 어렵다[1]. 또한 훈련 종료 후 일상으로 복귀한 대부분의 하지절단자들은 생활 속에서 이동(Ambulation)과 관련된 많은 한계를 경험하게 된다. 하지절단자들은 훈련 종료 후 일상생활을 통해 추가적으로 의지에 적응하게 되며 병원의 실내환경과 다른 실제 외부환경을 통해 보행능력이 강화되기도 하지만, 신체적 능력이

낮은 경우에는 일상생활 적응에 많은 어려움을 겪기도 한다[1,3]. 보행능력의 저하는 불규칙한 노면이나 연석 등으로 인한 낙상 빈도를 높이고, 전체 하지 절단자의 52-58%는 일 년에 한번 낙상을 경험한다고 한다[4,5]. 하지절단자 낙상의 주요 원인으로는 의지보행 습득의 어려움, 절단된 발이나 다리의 피드백 부재, 하체 체중분포의 변화, 건축과 의지측 하지의 움직임 조절하기 위한 기계적 어려움 등을 들 수 있으며[6], 자세 흔들림의 증가, 하지 감각 역치의 장애, 균형능력의 감소와 같은 생체역학적 특성들이 낙상과 관련이 있는 것으로 알려져 있다[4,7,8].

하지절단자의 보행능력은 절단자 삶의 질과 중요한 연관성이 있다. 퇴원 후 하지절단자의 보행능력은 개인의 신체적 능력 및

정신적 상태와 직업이나 스포츠 활동과 같은 지역사회 참여 여부에 따라 긍정적 또는 부정적으로 변화할 수 있다. 의지보행능력의 저하로 인한 일상생활이나 사회 활동의 제한은 전반적인 신체능력을 저하시켜 개인의 삶에 부정적인 영향을 미친다. 따라서 하지절단자들은 훈련이 종료된 후에도 보행능력을 일정한 수준으로 유지하기 위한 지속적인 노력이 필요하다[3,9-11].

선행연구에서 하지절단자의 보행능력은 다양한 방법으로 검증되었다. 주로 훈련 중재에 따른 의지보행 훈련의 효과를 분석하거나 일정한 재활훈련기간 동안 보행의 변화나 적응 형태에 대한 연구들이 진행되었다[12-15]. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 하지절단자의 보행능력이 훈련 종료 후에도 여러 요인들에 의해 영향을 받아 긍정적 또는 부정적인 방향으로 변화할 수 있음에도 불구하고 이들의 훈련 종료 후 보행능력의 변화에 대한 추적연구는 진행된 바 없으며, 기존의 하지절단자 관련 추적 연구들은 그들의 사망률이나 이환율 조사에 초점이 맞추어져 있었다[16].

우리는 다양한 선행연구를 통해 의지보행훈련의 효과성을 이미 확인하였다. 보행훈련을 통해 보행이 개선된다는 것은 명확한 사실이지만 훈련의 잔여효과(Detraining Effect)가 얼마만큼 유지되는지에 대한 정보도 매우 중요하다. 지속적인 운동을 통하여 얻어질 수 있는 보행능력의 향상 효과와 더불어 운동을 중단했을 때 그 효과가 어느 정도 지속되는지를 아는 것은 절단자 개인에게 보행을 유지하는데 필요한 매우 중요한 정보가 될 수 있다. 지금까지 모든 운동역학 분야에서 수행된 훈련 잔여효과에 대한 연구는 운동 중지 후 근력이 어느 정도 감소되었다고 평가하는 간접적인 방법들이 대부분이었다[17,18]. 특히 하지절단자의 의지보행훈련 후 잔여효과에 대한 연구는 지금까지 선행된 바 없으며, 따라서 이들이 훈련 종료 후에 일상생활 복귀를 통해 나타나는 보행특성 변화를 파악할 필요가 있다.

임상에서는 보행특성을 평가하기 위해 주로 보행분석을 활용한다. 보행분석은 훈련 중 진행상황을 모니터링 하거나 보행능력을 평가할 수 있는 매우 유용한 방법으로[14], 특히 보행속도는 보행능력을 평가할 수 있는 가장 좋은 단일 지표로 알려져 있다[19]. 이외에도 시·공간적 요인, 하지 관절각도, 모멘트 및 파워 등을 분석하여 보행특성을 파악할 수 있으며 보행 중 낙상과 관련해서는 하지 분절 간 협응(Coordination) 패턴을 분석하는 연구들이 많이 진행되었다[20-22]. 하지협응은 분절의 각도와 각속도를 통해 계산된 연속상대위상(Continuous Relative Phase, CRP)으로 정량화할 수 있으며, CRP는 단일관절각도를 분석하는 것보다 분절 간의 관계를 쉽게 파악할 수 있고, 시·공간적 패턴을 모두 고려하여 전반적인 하지 보행상태를 평가할 수 있는 장점이 있다[15,23,24].

앞서 언급한 바와 같이, 훈련이 종료된 후 일상생활에 복귀한 하지절단자들의 보행능력을 평가하는 것은 의지보행훈련에 대한 잔여효과를 분석할 수 있다는 측면에서 매우 유용한 정보가 될 것이며, 또 이를 기반으로 향후 새로운 하지절단자 재활훈련법과 가이드라인을 개발하거나 절단자 개인의 건강(보행)

유지를 위한 정보를 제공하는데 활용할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 재활이 종료된 편측 대퇴절단자를 대상으로 훈련이 종료된 시점과 1년이 경과한 시점의 보행상태의 차이를 비교하고, 보행능력의 변화에 영향을 미치는 요인을 분석하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구대상자

본 연구는 2015년부터 2018년까지 근로복지공단 재활공학연구소에서 운영하는 절단자 통합재활훈련 프로그램에 참여한 산재장애인의 보행분석 데이터를 기반으로 분석되었다. 이 기간에 통합재활훈련에 참여한 하지절단자는 총 30명으로 대퇴절단자 21명(양측 2명, 편측 19명), 하퇴절단자 7명(양측 2명, 편측 5명), 대퇴 및 하퇴 복합절단자 2명이다. 본 연구에서는 하지절단자의 절단 수준(Level)에 따른 보행의 차이를 최소화하기 위하여 전체 하지절단자 중 가장 많은 비중을 차지한 편측 대퇴절단자의 보행을 추적 분석하였다. 연구대상자 선정 조건은 다음과 같다. 최초 의지 착용자, 편측 대퇴절단자, 통합재활훈련에 최소 3개월 이상 참여한 자, 의지보행훈련 시작과 종료, 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점의 보행분석 데이터를 모두 보유한 자로 하였다. 편측 대퇴절단자는 총 19명으로 위 선정조건을 만족한 연구대상자는 7명이었다.

연구대상자의 일반적인 특성은 Table 1과 같다. 연구대상자의 연령, 신장, 체중, 체성분 지표(Body Mass Index, BMI), 활동레벨과 함께 훈련 종료 후 건강 상태나 활동 정도를 평가하기 위하여 취업 유무, 운동 여부, 동반질환(합병증)을 조사하였다. 편측 대퇴절단자의 활동 레벨은 절단자 이동성 예측(Amputee Mobility Predictor, AMP) 설문을 사용하여 분류하였으며, 의족을 착용한 상태에서 균형을 포함한 다양한 동작을 검사한 후 점수에 따라 K1부터 K4까지 K-Level을 정의한다. AMP는 47점 만점으로 K1(15-26점), K2(27-36점), K3(37-42점), K4(43-47점) 레벨로 구분되며, 레벨 숫자가 높을수록 활동성이 높음을 의미한다.

본 연구에 참여한 대상자의 평균 연령은 48.6 ± 9.3 세, 신장 173.7 ± 3.5 cm, 체중 77.6 ± 11.2 kg 이며, 좌측절단자 6명, 우측절단자 1명으로 모두 유압식 의지를 착용하였다. AMP 점수는 평균 41.0 ± 2.1 으로 K2 레벨의 대상자 1명을 제외한 나머지 6명이 모두 K3 레벨의 높은 활동도를 보였다. 또한 전체 7명 중 직장에 복귀한 자는 5명(71.4%), 평상시 운동을 실시하는 자는 4명(57.1%), 1개 이상의 동반질환을 가진 자는 3명(42.9%)으로 조사되었다.

2.2 보행분석

보행분석을 위해 8대의 적외선카메라(Eagle4, Motion Analysis, USA), 힘 측정판(Kistler, USA)과 측정용 소프트웨어(Cortex,

Table 1 Subject information (n = 7)

| Subject | Age [year] | Height [cm] | Weight [kg] | BMI [kg/m ²] | AMP score | Comorbidities | Employment | Exercise | Training period [month] |
|----------|------------|-------------|-------------|--------------------------|-----------|---------------|------------|----------|-------------------------|
| A | 45 | 168.2 | 70.9 | 25.1 | 42 | No | Yes | Yes | 5 |
| B | 35 | 169.8 | 69.1 | 24.0 | 42 | Yes | No | No | 5 |
| C | 55 | 171.6 | 67.8 | 23.0 | 42 | Yes | Yes | Yes | 4 |
| D | 52 | 177.4 | 73.8 | 23.5 | 42 | No | Yes | Yes | 5 |
| E | 65 | 175.3 | 71.4 | 23.2 | 41 | No | No | Yes | 3 |
| F | 39 | 178.0 | 94.0 | 29.7 | 42 | No | Yes | No | 5 |
| G | 49 | 175.3 | 96.2 | 31.3 | 36 | Yes | Yes | No | 5 |
| mean±sd. | 48.6±9.3 | 173.7±3.5 | 77.6±11.2 | 25.7±3.4 | 41.0±2.1 | - | - | - | - |

Body Mass Index (BMI); Amputee Mobility Predictor (AMP)

Motion Analysis, USA)로 구성된 3차원 동작분석 시스템을 사용하였다. Helen Hayes 마커 셋에 따라 19개의 반사마커를 연구대상자의 해부학적 위치에 부착하여 정적 검사를 실시하고, 4개의 내측 마커를 제거한 후 보행을 실시하였다. 연구대상자는 10 m 길이의 보행로를 자신이 선택한 보행속도(Self-Selected Walking Speed)로 보행하였으며, 총 5회 보행을 실시한 후 평균 값을 사용하였다.

2.3 측정변수

2.3.1 시공간적 요인(Spatiotemporal Parameter)

보행의 일반적인 향상성을 평가하기 위해 보행속도(Walking Velocity, cm/sec), 분속수(Cadence, steps/min), 보폭(Step Width, cm), 입각기(Stance Pahse, %), 활보장(Stride Length, cm)을 분석하였다. 또한 보행의 대칭성을 평가하기 위해 절단측의 입각기 시간을 건측의 입각기 시간으로 나눈 입각기 시간 비율(Stance Time Ratio)과 절단측의 보장을 건측의 보장으로 나눈 보장 비율(Step Length Ratio)을 분석하였다. 입각기 및 보장 비율은 각각 1에 근접할수록 대칭적인 것으로 해석한다[2].

2.3.2 연속상대위상(Continuous Relative Phase)

양측 하지의 협응성을 평가하기 위하여 연속상대위상(CRP)을 분석하였으며, 본 연구에서는 양측 하지 내 엉덩관절과 무릎관절 간의 협응을 평가하였다. 두 관절 사이의 CRP를 구하는 공식은 다음과 같다.

먼저, 보행 시 획득된 관절의 각도를 통해 각 관절의 각속도를 계산하고 보행 전체 주기를 0-100%로 정규화 하였으며, 관절 각도와 각속도를 각각 -1부터 +1까지 정규화 하였다. 정규화된 관절 각도와 각속도를 각각 x축과 y축으로 하여 위상각(Phase Angle, ϕ)을 산출하고, 최종적으로 엉덩관절(근위부 관절)의 위상각과 무릎관절(원위부 관절)의 위상각 차를 통해 CRP를 계산하였다[26].

본 연구에서는 보행주기를 입각기와 유각기로 구분하여 CRP를 계산하였으며, CRP의 RMS (Root Mean Square) 값을 계산하여

비교하였다[27].

$$CRP_i = |\phi_{i,prox} - \phi_{i,dist}| \tag{1}$$

또한 양측 하지의 CRP 대칭성을 정량적으로 평가하기 위해 건측과 환측의 값을 비교할 수 있는 대칭 지수(Symmetry Index, SI)를 계산하였으며, 이때 편측 다리 값(보다 작은 값)을 반대측 다리의 변수값으로 나누어 대칭 지수를 계산하였다.

$$SI = \frac{\min(R, L)}{\max(R, L)} \times 100 \tag{2}$$

여기서 SI는 대칭 지수를 의미하며, R은 우측 다리 값, L는 좌측 다리 값을 의미한다.

2.4 데이터 분석

보행분석 데이터는 훈련 종료 시점(End of Training)과 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점(After 1 Year)을 비교하였으며, 시공간적 요인과 연속상대위상을 분석하였다.

통계적 분석을 위해 SPSS (ver. 18.0) 통계 프로그램을 사용하였으며, 훈련 종료 시점과 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점의 비교를 위해 윌콕슨 부호 순위 검정(Wilcoxon Signed-Rank Test)을 실시하였다. 또한 연구대상자의 나이, BMI, 동반질환, 활동 레벨, 취업 및 운동 여부와 같은 신체상태나 활동 요인들이 보행속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 피어슨 상관분석(Pearson Correlation Analysis)을 실시하였으며, 모든 결과의 통계적 유의수준은 $p < .05$ 로 하였다.

3. 연구결과

3.1 시공간적 요인(Spatiotemporal Parameter) 비교 결과

훈련 종료 시점과 종료 후 1년이 경과한 시점의 보행속도, 보폭, 분속수, 활보장, 입각기, 보장, 입각기 및 보장 비율을 비교한 결과는 Table 2와 같다. 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점의 보행속도, 보폭, 분속수, 활보장의 평균값은 각각 106.9 cm/s,

Table 2 Result of spatiotemporal parameters

| Spatiotemporal parameters | Beginning of training | End of training | After 1 year | Mean diff. [%] | z | p-value | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------|--------------|----------------|-------|---------|------|
| Walking velocity [cm/s] | 60.9±15.2 | 106.4±21.3 | 106.9±16.5 | 0.5 | -.314 | .753 | |
| Step width [cm] | 18.7±2.1 | 17.7±3.0 | 17.6±6.7 | -0.6 | -.318 | .750 | |
| Cadence [steps/min] | 75.1±11.8 | 99.9±9.5 | 101.3±8.1 | 1.4 | -.931 | .352 | |
| Stride length [cm] | 95.4±10.6 | 127.0±15.7 | 125.7±12.8 | -1.0 | -.338 | .735 | |
| Stance phase [%] | Prosthetic | 61.8±2.6 | 61.3±2.6 | 60.4±1.8 | -1.5 | -.938 | .348 |
| | Intact | 70.5±1.5 | 68.6±2.6 | 67.4±2.8 | -1.7 | -1.20 | .230 |
| | Ratio | 87.8±5.5 | 89.3±4.3 | 89.7±3.0 | 0.4 | -.085 | .932 |
| Step length [cm] | Prosthetic | 51.2±6.8 | 68.4±11.1 | 66.9±7.4 | -2.2 | -.511 | .610 |
| | Intact | 44.2±6.3 | 58.3±6.2 | 59.1±6.7 | 1.4 | -.508 | .611 |
| | Ratio | 117.2±18.2 | 117.4±14.8 | 113.6±10.2 | -3.2 | -.933 | .351 |

Table 3 Result of continuous relative phase

| Continuous relative phase | | Beginning of training | End of training | After 1 year | Mean diff. [%] | z | p-value | |
|---------------------------|--------|-----------------------|-----------------|--------------|----------------|-------|---------|-------|
| CRP-RMS [°] | Stance | Prosthetic | 77.3±9.9 | 83.0±6.1 | 84.3±4.1 | 1.6 | -.593 | .553 |
| | | Intact | 83.2±10.5 | 86.7±8.2 | 88.4±6.6 | 2.0 | -1.063 | .288 |
| | | SI | 89.4±5.5 | 92.0±6.4 | 95.4±4.6 | 3.7 | -1.612 | .107 |
| | Swing | Prosthetic | 123.7±15.3 | 116.4±17.5 | 118.6±20.7 | 1.9 | .000 | 1.000 |
| | | Intact | 90.9±9.9 | 87.7±4.8 | 91.9±18.2 | 4.8 | -.339 | .735 |
| | | SI | 71.4±15.7 | 77.3±15.4 | 74.6±13.6 | -3.5 | -.677 | .498 |
| CRP-SD [°] | Stance | Prosthetic | 40.0±7.0 | 43.1±5.5 | 41.9±7.9 | -2.8 | -.594 | .553 |
| | | Intact | 43.1±4.1 | 46.6±4.4 | 45.3±6.2 | -2.8 | -.594 | .553 |
| | | SI | 88.4±7.9 | 84.9±10.7 | 80.9±12.2 | -4.7 | -1.101 | .271 |
| | Swing | Prosthetic | 30.5±9.7 | 37.0±9.8 | 33.0±13.5 | -10.8 | -.943 | .345 |
| | | Intact | 13.5±2.3 | 11.6±2.1 | 24.7±25.1 | 112.9 | -1.693 | .090 |
| | | SI | 46.9±8.7 | 33.1±9.8 | 52.4±21.9 | 58.3 | -1.859 | .063 |

17.6 cm, 101.3 steps/min과 125.7 cm로 훈련 종료 시점과 비교하여 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 또한 1년 경과 후 입각기 비율과 보행 비율의 평균값도 각각 89.7%와 113.6%로써 훈련 종료 시점과 비교하여 유의한 차이가 없었다. 이는 훈련 종료 시점의 보행이 훈련 종료 후 1년이 경과한 후에도 유지된 것으로 해석된다.

3.2 연속상대위상(Continuous Relative Phase) 비교 결과

훈련 종료 시점과 훈련 종료 후 1년 경과 시점의 연속상대위상(CRP)을 비교한 결과는 Table 3과 같다. 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점에서 입각기 의지측과 건측의 CRP-RMS 평균값은 각각 84.3°와 88.4°로서 훈련 종료 시점보다 약간 증가하였지만 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 또한 유각기 의지측과 건측의 CRP-RMS 평균값도 두 시점에서 유의한 차이를 보이지 않았다.

훈련 종료 후 1년이 경과한 시점에서 입각기 의지측과 건측의 CRP-SD 평균값은 각각 41.9°와 45.3°로 약간 감소하는 경향을 보였지만 통계적으로 유의하지는 않았다. 특히 유각기 의지측과

건측의 CRP-SD값이 각각 10.8% 감소하고, 112.9% 증가하면서 다른 변수들보다 많은 변화량을 나타냈지만 역시 통계적으로 유의하지는 않았다. 양측의 CRP-SD의 대칭성(SI)도 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점에서 보다 대칭적으로 변화하였지만 통계적으로 유의하지 않았다. 하지협응 상태는 훈련 종료 후 1년이 경과한 후에도 크게 변화하지 않고 훈련 종료 시점의 상태를 유지하고 있음을 확인하였다.

3.3 보행속도와 개인신체상태 및 활동 요인 간 상관분석

보행속도는 보행의 향상 정도를 평가할 수 있는 가장 대표적인 변수이다. 본 연구에 참여한 7명의 대상자들은 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점에서 보행속도가 증가하거나 감소, 또는 유지되는 경향을 보였다.

보행속도가 향상된 대상자는 4명으로, 총 7명 중 57.1%를 차지하였으며 보행속도가 퇴보한 대상자는 2명(28.6%), 유지되었던 대상자는 1명(14.3%)으로 나타났다(Table 4).

보행속도가 향상된 그룹에서, 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점의 보행속도 평균값은 111.0 cm/s로 훈련 종료 시점보다 7.5%

Table 4 Changes in walking velocity after 1 year of training

| Change in walking velocity [cm/s] | Number of people | % of total | Discharge | After 1 year | % difference |
|-----------------------------------|------------------|------------|------------|--------------|--------------|
| Improvement | 4 | 57.1 | 103.3±11.1 | 111.0±8.5 | 7.5 |
| Degradation | 2 | 28.6 | 112.5±47.4 | 98.5±34.6 | -12.4 |
| Maintenance | 1 | 14.3 | 107.0 | 107.0 | 0.0 |

Table 5 Correlation analysis between walking velocity improvement and physical condition and activity factors

| | | Age | BMI | Stump pain | Comorbidity | Employment | AMP score | Exercise |
|------------------|-------------------------|------|-------|------------|-------------|------------|-----------|----------|
| Walking velocity | Pearson CC [§] | .476 | -.522 | .240 | -.077 | .806* | .189 | .510 |
| | p-value | .280 | .198 | .604 | .870 | .029 | .684 | .243 |

[§]Correlation Coefficient, * $p < .05$

증가하였다. 또한 보행속도가 퇴보한 그룹에서 1년 후 보행속도는 98.5 cm/s로 12.4% 감소하였다. 보행속도가 유지된 대상자의 보행속도는 107.0 cm/s로 나타났다(Table 4). 보행속도의 변화에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위하여 연구대상자의 신체적 요인(나이, BMI, 동반질환) 및 활동 요인(취업, 운동)과 보행속도 간 상관분석을 실시하였다. 상관분석 결과, 보행속도의 향상에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 취업으로 분석되었으며, 상관계수 $r = 0.806$ ($p < .05$)으로 강한 양의 상관관계를 보였다(Table 5).

4. 논의

본 연구에서는 의지보행훈련이 종료된 하지절단자들의 훈련 종료 후 보행능력의 변화를 확인하기 위하여 편측 대퇴절단자들을 대상으로 훈련 종료 시점과 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점의 보행상태를 비교하였다. 보행상태는 보행의 시공간적 요인과 하지 협응 능력을 분석하였으며, 개인의 신체상태나 활동 정도가 보행속도의 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

4.1 시공간적 요인 및 하지 협응의 변화

먼저 편측 대퇴절단자들의 보행 중 시공간적 요인을 분석한 결과, 훈련 종료 후 1년 경과 시점에서 시공간적 요인들의 유의한 변화는 없었다. 시공간적 요인의 전후 평균값의 차이를 살펴보면, 대부분 오차범위 내의 변화로 1-3% 수준의 평균 차이를 보였으며 이는 훈련 종료 시점의 보행상태가 대부분 유지되는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 결과는 보행능력을 평가할 수 있는 대표 변수인 보행속도가 훈련 종료 시점과 1년 경과 시점에서 거의 차이가 없었으며(106.4 vs. 106.9 cm/s), 보행속도와 연동되는 보장, 분속수, 활보장, 입각기와 보장 비율의 변수들도 거의 변화가 없었음을 확인하였다.

또한 본 연구에서는 보행 중 양측 하지의 분절 간 협응력을 평가하기 위해 고관절과 슬관절 간 연속상대위상(CRP)을 분석하였다. 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점의 CRP-RMS 평균값과 CRP-SD 평균값은 훈련 종료 시점과 유의한 차이가 없었다.

이는 시공간적 요인과 마찬가지로 훈련 종료 후 1년 경과 시점에서 훈련 종료 시점의 하지 분절의 협응력을 계속 유지하고 있음을 의미한다.

기본적으로 편측 대퇴절단자들은 보행 시 양측 하지의 비대칭적인 협응 특성을 보이며 정상인보다 In-Phase 형태를 나타낸다[25]. CRP는 보행속도와 연관성이 높아서 보행속도가 증가하게 되면 CRP-RMS 값도 점점 Out-Phase 형태로 커지게 된다[28]. 재활 초기 대퇴절단자들은 보행속도가 느리기 때문에 고관절과 슬관절 간 CRP-RMS 값은 처음에는 In-Phase 형태를 보이다가, 의지보행훈련을 통해 보행속도가 증가하면서 CRP-RMS 값은 점점 Out-Phase 형태로 커지게 된다[26]. 또한 관절 간 협응의 변동성(Variability)을 의미하는 CRP-SD 값은 보행속도가 증가하면서 의지측의 CRP-SD 값은 감소하고, 건측의 CRP-SD 값은 증가하는 경향을 보인다. 특히 입각기 CRP-SD 값의 경우 건측이 환측보다 높은 특성을 보이는데, 이는 지면에 다리가 닿아 있는 입각기 동안에 체성감각이 관절의 위치 정보를 확인하여 자세를 잡게 되는데, 이때 인공다리인 의지측보다는 체성감각이 살아있는 건측 하지에서 더 높은 변동성을 보이게 된다[29]. 본 연구결과에서 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점의 CRP 평균값들은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았지만, 평균 차이를 보면 보행의 유각기에서 의지측의 CRP-SD 평균값이 10.8% 감소하고 건측의 CRP-SD 값은 112.9% 증가한 것을 알 수 있다. 또한 유각기 동안 양측 하지의 CRP 대칭성(SI)도 33.1%에서 58.3%로 향상되었으며, 이러한 결과는 데이터 간 편차가 큼으로 인해 통계적으로 유의한 결과까지 이어지지는 않았지만 분명 평균값의 긍정적인 변화를 확인할 수 있었다.

Chang 등(2018)의 선행연구에서 의지보행훈련 기간 동안 보행속도의 향상률이 가장 좋았던 시점은 훈련 시작 후 약 30일이 경과한 시점이었으며, 보행 협응이 가장 좋았던 시점은 훈련 후 약 90일이 경과한 시점으로 보고되었다. 이 연구에서 저자들은 의지보행훈련을 통해 보행속도가 가장 먼저 향상되고 보행의 협응은 보행속도보다 낮은 향상률을 보이면서 서서히 완성되어 간다고 하였다[25]. 이 연구결과에서 보여준 CRP-SD 값의 변화 형태는 본 연구결과와 유사하였으며, 비록 결괏값의 차이가

통계적으로 유의하지 않았지만 보행속도의 변화 없이 하지 협응은 훈련 종료 후 1년이 지난 시점에서도 꾸준히 향상되는 것을 확인하였다. 향후 대상자 수와 추적 기간을 확대하여 하지협응의 적응이나 변화에 대한 지속적인 관찰이 요구된다.

4.2 보행속도와 개인신체상태 및 활동 요인 간 상관성

다음은 본 연구에 참여한 편측 대퇴절단자의 훈련 종료 후 1년이 지난 시점에서 보행능력에 영향을 주는 요인을 분석하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 보행속도는 보행의 일반적인 향상 정도를 평가할 수 있는 가장 대표적인 변수로서 보행의 능력은 보행속도의 변화로 평가하였다[19]. 본 연구결과 훈련 종료 시점과 1년 경과 시점 간 전체 평균값의 차이는 없었지만, 개개인의 보행속도를 살펴보면 그룹 내 보행속도의 편차가 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 본 연구에 참여한 대상자 7명 중 4명은 보행속도가 7.5% 향상되었으며, 2명은 12.4% 감소, 1명은 유지되는 것으로 나타났다. 보행이 향상된 연구대상자는 전체 7명 중 57.1%로 과반수 이상을 차지하였으며, 보행이 퇴보한 대상자는 2명으로 전체 28.6%를 차지하였다.

병원에서 의지보행훈련을 받은 하지절단자들은 완벽한 보행능력을 갖춘 상태는 아니지만 일상생활에서 어느 정도 독립적인 보행이 가능할 때 훈련을 종료하게 된다. 이들의 의지보행훈련 기간은 개인의 신체적인 상태나 능력에 따라 다르겠지만, 편측 대퇴절단자들의 경우 보통 107.1±36.4일의 훈련기간이 소요된다고 알려져 있다[25]. 임상에서 살펴보면, 개인차는 있겠지만 대부분의 하지절단자들은 완벽하게 보행이 완성된 상태에서 훈련을 종료한다고 보기는 어려우며, 대부분 훈련 종료 후 일상생활이나 개인 운동을 통해 의지에 적응하면서 보행이 좀 더 개선되거나 훈련 종료 시점의 보행 수준을 유지하게 된다. 반면 절단 외 합병증이나 환부 통증과 같은 신체적인 문제나 우울증과 같은 정신적인 문제로 인해 주로 집안에서만 생활할 경우 오히려 훈련 종료 시점보다 보행능력이 퇴보하기도 한다.

본 연구결과에서도 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점에서 연구대상자들은 보행속도가 향상 또는 유지되거나 퇴보하는 경향을 보였다. 이러한 보행속도 변화에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위하여 연령, BMI, 동반질환의 유무, 직업 유무, 활동 수준(AMP 점수) 및 운동 여부와 같은 요인들과 보행속도 간 상관 분석을 실시하였다. 상관 분석 결과, 취업 요인만이 보행속도와 강한 상관관계를 보였으며($r = .806, p < .05$), 직업 외 연령, BMI, 동반질환, 활동 수준, 운동은 보행속도와 상관이 없었다.

선행연구에 의하면, 하지절단 후 직장에 고용된 사람들이 1년 후 시점에서 보행거리, 최대 연속보행시간 및 의지의 전반적인 기능 사용이 향상되었다고 하였으며[30], 이는 우리 연구와 유사한 결과이다. 본 연구에서 보행의 향상을 보였던 4명의 대퇴절단자들은 모두 훈련 종료 후 직장에 복귀하였으며, 직장복귀는 자연적으로 활동 수준을 높여 결과적으로 보행능력을 향상시킨 것으로 사료된다. 또한, 본 연구의 상관분석 결과에서 취업 요인을 제외한 연령, BMI, 동반질환, 활동 수준 및 운동

여부는 보행속도와 유의한 상관성이 없었다. 유사 선행연구에서 외상성 대퇴절단자들이 훈련 종료 후 스포츠 활동에 참여한 후 보행능력이 향상되었다고 보고되었지만, 우리 연구에서는 운동과 보행속도 간 상관성을 확인할 수는 없었다. 본 연구에 참여한 대상자 7명 중 4명은 훈련 종료 후 일주일에 3일 이상 꾸준히 걷기 운동을 시행하였으며, 이들 중 2명은 보행이 향상되었지만 또 다른 한 명은 보행의 유지, 나머지 한 명은 오히려 보행능력이 저하되었다. 보행이 유지되었던 대퇴절단자의 경우, 65세의 고령이었지만 꾸준한 운동을 통해 보행상태를 유지한 것을 확인하였으며, 보행능력이 저하된 나머지 한 명도 결과적으로 보행속도는 저하되었지만 훈련 종료 시점의 보행속도(146.0 cm/s)가 일반인보다 매우 높았기 때문에 훈련 종료 후 보행속도가 123.5 cm/s로 저하되었다고 하더라도 본 연구결과의 평균 보행속도(106.9 cm/s)보다 13.4% 높은 수준이다. 이러한 점을 감안하면 보행속도와 운동의 상관성이 통계적으로 유의하지는 않았지만, 꾸준한 운동이 보행능력의 유지나 향상에 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.

보행능력과 연령의 상관관계를 보고한 선행연구에서 고령 절단자는 잠재적인 보행능력이 낮다고 하였지만, 일부 연구에서는 고령과 보행능력의 연관성은 없으며 연령이 높을수록 동반질환을 가질 확률이 높기 때문에 이러한 요인이 연령이 보행에 미치는 영향으로 혼동하여 해석될 수 있다고 주장하였다[31]. 본 연구결과처럼 65세 고령 절단자가 젊은 사람보다 기본적인 신체능력이 저하되어 있음에도 불구하고 꾸준한 걷기운동을 통해 보행능력을 유지한 것은 고령으로 인한 신체적 한계도 지속적인 운동을 통해 보행능력을 유지하고 향상시킬 수 있음을 시사한다.

또한 본 연구에 참여한 대상자 7명 중 절단 외 동반질환을 가진 사람은 3명이었다. 3명 중 2명은 직장에 복귀하였고, 나머지 한 명은 직장에 복귀하지 않았다. 개인마다 동반질환의 정도 차이가 있겠지만, 동반질환이 있음에도 불구하고 직장에 복귀하여 일상생활을 유지했던 2명은 훈련 종료 1년 후 보행이 향상되는 결과를 가져왔고, 연령이 35세로 연구대상자 중 가장 젊었지만 취업과 운동에 참여하지 않았던 사람은 보행능력이 퇴보하는 결과로 이어졌다. 선행연구에서 연령이 젊을수록 보행능력의 예후가 좋다고 하였지만, 동반질환으로 인한 신체적인 능력의 감소는 연령과 상관없이 1년 후 보행능력의 감소를 가져왔으며 이는 나이보다는 동반질환으로 인한 일상생활활동의 감소가 보행능력에 더 큰 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 하지절단자들의 훈련 종료 후 보행능력을 유지하기 위해서는 절단 외 동반질환(합병증)의 관리를 통해 신체적인 건강을 유지하여야 하며, 무엇보다 직업 활동이나 운동 참여 등을 통해 자연스럽게 활동성을 유지하는 것이 중요하다고 생각한다.

하지절단자들이 훈련 종료 후에도 의지보행훈련의 효과를 꾸준히 유지하는 것은 개인의 삶의 질을 높인다는 측면에서 매우 중요하다[32]. 모든 일상생활과 연결된 보행능력의 감소는 일상생활환경에서 낙상의 위험성을 높이며[33], 또한 소극적인 사회

참여와 비활동적인 내주(Indwelling) 습관은 이차적인 합병증의 유발 등 개인의 신체적·정신적 건강에도 부정적인 영향을 미친다[34]. 따라서 하지절단자들이 훈련 종료 후에도 보행능력을 유지하기 위해서는 직업이나 사회 참여를 통한 활동성을 증가시킬 필요가 있으며, 스스로 운동하는 습관을 통해 자가 건강관리를 하여야 한다. 특히 훈련이 종료되기 전 절단환자들에게 보행을 유지하기 위해 직업이나 운동의 중요성을 강조하고, 보행능력 유지를 위한 가이드라인을 제공할 필요가 있다.

본 연구의 제한점은 대상자 수가 적고, 보행능력에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위해 신체능력, 직업, 운동과 같은 일부 요인만 분석했다는 점이다. 따라서 향후 대상자 수를 확대하고, 인지(Cognition), 체력(Fitness), 균형능력, 일상생활활동의 독립성과 수술 전 이동성, 스텝프 통증 등과 같은 다양한 요인들을 추가하여 하지절단자 보행능력에 미치는 요인에 대한 연구를 진행하여야 할 것이다[34].

5. 결론

본 연구에서는 편측 대퇴절단자들을 대상으로 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점에서 보행상태의 변화와 보행능력에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 연구결과, 훈련 종료 후 1년이 경과한 시점에서 보행속도를 포함한 시공간적 요인과 하지 협응력의 유의한 변화는 없었으며 훈련 종료 후에도 보행능력이 잘 유지되고 있음을 확인하였다. 또한 보행속도의 향상에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 취업인 것으로 나타났으며, 이외 나이, BMI, 동반질환, 활동 수준 및 운동여부 등의 요인들은 보행속도와 유의한 상관성이 없었다.

본 연구에서는 대상자 수가 적어 보행능력의 변화에 대한 다양한 경우를 파악할 수는 없었지만 취업, 운동과 같은 사회참여나 활동이 개인의 보행능력을 유지하거나 향상시키는데 매우 중요한 요인임을 알 수 있었다. 본 연구결과는 하지절단자들의 새로운 재활훈련법 개발이나 개인의 건강 유지를 위한 가이드라인을 제공하는데 기초자료로 활용하고자 한다.

REFERENCES

1. Bussmann, J. B., Grootcholten, E. A., Stam, H. J., (2004), Daily physical activity and heart rate response in people with a unilateral transtibial amputation for vascular disease, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(2), 240-244.
2. Hagberg, K., Brånemark, R., (2001), Consequences of non-vascular trans-femoral amputation: A survey of quality of life, prosthetic use and problems, *Prosthetics and Orthotics International*, 25(3), 186-194.
3. MScOT, A. M., MScOT, K. P., Michael Devlin, M., Steven

- Dilkas, M., (2016), Balance confidence and activity of community-dwelling patients with transtibial amputation, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 53(5), 551-560.
4. Kulkarni, J., Wright, S., Toole, C., Morris, J., Hiron, R., (1996), Falls in patients with lower limb amputations: Prevalence and contributing factors, *Physiotherapy*, 2(82), 130-136.
5. Miller, W. C., Speechley, M., Deathe, B., (2001), The prevalence and risk factors of falling and fear of falling among lower extremity amputees, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 82(8), 1031-1037.
6. Pauley, T., Devlin, M., Heslin, K., (2006), Falls sustained during inpatient rehabilitation after lower limb amputation: Prevalence and predictors, *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 85(6), 521-532.
7. Buckley, J. G., O'Driscoll, D., Bennett, S. J., (2002), Postural sway and active balance performance in highly active lower-limb amputees, *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 81(1), 13-20.
8. Kavounoudias, A., Tremblay, C., Gravel, D., Iancu, A., Forget, R., (2005), Bilateral changes in somatosensory sensibility after unilateral below-knee amputation, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(4), 633-640.
9. Bussmann, J. B., Schrauwen, H. J., Stam, H. J., (2008), Daily physical activity and heart rate response in people with a unilateral traumatic transtibial amputation, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 89(3), 430-434.
10. Couture, M., Caron, C. D., Desrosiers, J., (2010), Leisure activities following a lower limb amputation, *Disability and Rehabilitation*, 32(1), 57-64.
11. Zidarov, D., Swaine, B., Gauthier-Gagnon, C., (2009), Life habits and prosthetic profile of persons with lower-limb amputation during rehabilitation and at 3-month follow-up, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 90(11), 1953-1959.
12. Yiğiter, K., Şener, G., Erbahceci, F., Bayar, K., Ülger, Ö., Akdoğan, S., (2002), A comparison of traditional prosthetic training versus proprioceptive neuromuscular facilitation resistive gait training with trans-femoral amputees, *Prosthetics and Orthotics International*, 26(3), 213-217.
13. Bae, A., (2017), Effectiveness of proprioceptive neuromuscular facilitation in comparison to traditional prosthetic training on unilateral lower limb amputee gait: A meta-analysis, Ph.D. Thesis, California State University.
14. Baker, P., Hewison, S., (1990), Gait recovery pattern of unilateral lower limb amputees during rehabilitation, *Prosthetics and Orthotics International*, 14(2), 80-84.
15. Chang, Y., Ko, C.-Y., Jeong, B., Kang, J., Choi, H.-J., Kim, G., Shin, H., Park, S., (2022), Changes in spatiotemporal parameters and lower limb coordination during prosthetic gait training in unilateral transfemoral amputees, *International Journal of*

- Precision Engineering and Manufacturing, 23(3), 361-373.
16. Ploeg, A., Lardenoye, J.-W., Peeters, M.-P. V., Breslau, P., (2005), Contemporary series of morbidity and mortality after lower limb amputation, *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 29(6), 633-637.
 17. Harris, C., DeBeliso, M., Adams, K. J., Irmischer, B. S., Gibson, T. A. S., (2007), Detraining in the older adult: Effects of prior training intensity on strength retention, *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 813-818.
 18. Tokmakidis, S. P., Kalapotharakos, V. I., Smilios, I., Parlavantzas, A., (2009), Effects of detraining on muscle strength and mass after high or moderate intensity of resistance training in older adults, *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 29(4), 316-319.
 19. Skinner, H. B., Effeney, D. J., (1985), Gait analysis in amputees, *American Journal of Physical Medicine*, 64(2), 82-89.
 20. Chiu, S.-L., Chou, L.-S., (2012), Effect of walking speed on inter-joint coordination differs between young and elderly adults, *Journal of Biomechanics*, 45(2), 275-280.
 21. Krasovsky, T., Lamontagne, A., Feldman, A. G., Levin, M. F., (2014), Effects of walking speed on gait stability and interlimb coordination in younger and older adults, *Gait & Posture*, 39(1), 378-385.
 22. Chiu, S.-L., Chang, C.-C., Dennerlein, J. T., Xu, X., (2015), Age-related differences in inter-joint coordination during stair walking transitions, *Gait & Posture*, 42(2), 152-157.
 23. Haddad, J. M., Van Emmerik, R. E., Whittlesey, S. N., Hamill, J., (2006), Adaptations in interlimb and intralimb coordination to asymmetrical loading in human walking, *Gait & Posture*, 23(4), 429-434.
 24. Chiu, S.-L., Lu, T.-W., Chou, L.-S., (2010), Altered inter-joint coordination during walking in patients with total hip arthroplasty, *Gait & Posture*, 32(4), 656-660.
 25. Chang, Y. H., Ko, C. Y., Jung, B. R., Kang, J. S., Kim, G. S., Ryu, J. C., (2018), Analysis on change in lower limb coordination in unilateral transfemoral amputees with integrated rehabilitation program, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(1), 41-46.
 26. Burgess-Limerick, R., Abernethy, B., Neal, R. J., (1993), Relative phase quantifies interjoint coordination, *Journal of Biomechanics*, 26(1), 91-94.
 27. Kurz, M. J., Stergiou, N., (2002), Effect of normalization and phase angle calculations on continuous relative phase, *Journal of Biomechanics*, 35(3), 369-374.
 28. Van Emmerik, R. E. A., Wagenaar, R., (1996), Effects of walking velocity on relative phase dynamics in the trunk in human walking, *Journal of Biomechanics*, 29(9), 1175-1184.
 29. Hamill, J., Palmer, C., Van Emmerik, R. E., (2012), Coordinative variability and overuse injury, *Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation, Therapy & Technology*, 4(1), 1-9.
 30. Pohjolainen, T., Alaranta, H., (1991), Predictive factors of functional ability after lower-limb amputation, *Annales Chirurgiae et Gynaecologiae*, 36-39.
 31. Johnson, V., Kondziela, S., Gottschalk, F., (1995), Pre and post-amputation mobility of trans-tibial amputees: Correlation to medical problems, age and mortality, *Prosthetics and Orthotics International*, 19(3), 159-164.
 32. Gerhards, F., Florin, I., Knapp, T., (1984), The impact of medical, reeducational, and psychological variables on rehabilitation outcome in amputees, *International Journal of Rehabilitation Research*, 7(4), 379-388.
 33. Highsmith, M. J., Schulz, B. W., Hart-Hughes, S., Latlief, G. A., Phillips, S. L., (2010), Differences in the spatiotemporal parameters of transtibial and transfemoral amputee gait, *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 22(1), 26-30.
 34. Sansam, K., Neumann, V., O'Connor, R., Bhakta, B., (2009), Predicting walking ability following lower limb amputation: A systematic review of the literature, *Journal of Rehabilitation Medicine*, 41(8), 593-603.



Bo Ra Jeong

Researcher at RERI in Korea. She received her master's degree in Engineering from Yonsei University, and was interested in medical engineering, rehabilitation, and motion analysis.

E-mail: jeongbora77@comwel.or.kr



Gyoo Suk Kim

Ph.D. graduated from the Department of Mechanical Engineering at Yonsei University, and Manager of the R&D Center at RERI. His research interests are intelligent robot systems, human-machine interface, and wearable robotic systems.

E-mail: gskim7379@comwel.or.kr



Yun Hee Chang

Ph.D. graduated from the Department of Physical Therapy at Sahmyook University, and a senior researcher at RERI. Her research interests are in rehabilitation, bio-mechanics, and motion analysis.

E-mail: yhchang2@comwel.or.kr