

정상성인에서 경사면 보행의 분석

연세대학교 의과대학 재활의학교실 및 재활의학연구소

배하석 · 박창일 · 신지철 · 김용욱 · 노준래 · 장지훈

Kinematic Gait Analysis of Ramp Walking in Normal Adult

Hasuk Bae, M.D., Chang Il Park, M.D., Ji Cheol Shin, M.D., Yong Wook Kim, M.D., Joon Lae Roh, M.D. and Ji Hoon Jang, M.D.

Department of Rehabilitation Medicine and Research Institute of Rehabilitation Medicine, Yonsei University College of Medicine

Objective: To investigate the characteristics of ramp walking.
Method: The sagittal kinematic and temporospatial data of ramp and level walking were obtained by a motion analyzer for ten healthy young adults.

Results: Compared with the values of level walking, the range of motion of ankle at all degrees for up-hill walking and the ROM of hip at 20° down-hill and all degrees for up-hill walking were significantly different ($p < 0.05$). The peak dorsiflexion of ankle at 20° of up-hill and at 20° down-hill walking increased significantly ($p < 0.05$) and peak plantar flexion of ankle at all degrees of up-hill walking increased significantly ($p < 0.05$). The peak flexion

of knee at 20° of up-hill walking increased significantly ($p < 0.05$) and peak extension of knee at 20° of up-hill and down-hill walking also increased significantly ($p < 0.05$). The peak flexion angles of hip at all degrees for up and down-hill walking were significantly different ($p < 0.05$) and peak extension angles of hip at 10° of up-hill walking increased significantly ($p < 0.05$). The temporospatial data showed no significant difference.

Conclusion: Ramp walking showed a different kinematic gait pattern. So, this study may be useful to evaluate the effect of gait training on the ramp and pathologic gait patterns. (*J Korean Acad Rehab Med* 2003; 27: 952-957)

Key Words: Ramp walking, Kinematic analysis, Gait

서 론

보행은 일상생활동작에 매우 중요한 역할을 하며 이에 대해서는 폭넓은 연구가 진행되어 왔으며, 대부분의 연구가 평지보행에 대한 것이었다. 일상생활 환경에는 평지만이 있는 것이 아니므로 경사로 보행에 대한 생역학적 이해는 치료자에게 매우 중요한 일이다. 경사로 보행은 보행 훈련 시 기본적인 요소이며, 경사로 보행 시 발목, 무릎, 고관절의 병변이 보다 두드러진 증상을 보이게 되어, 경사로 보행에 대한 체계적인 이해는 하지의 기능을 분석하고, 하지 기능에 영향을 미치는 여러 질환의 역학적 병인을 연구하는데 필수적이다.¹³⁾ 계단 오르기 동작에 대해서는 비교적 다양한 연구가 되어왔으며, 이를 통한 하지관절 대치술이나 하지의지 제작 디자인의 기준에 대해서도 제시되었으

나,^{1,2,4,7,9)} 경사로를 대상으로 한 연구는 미미한 실정이다. 또한 측면에서 경사로 보행 동작에 대한 객관적인 정상인의 자료가 필요함에도 불구하고 아직까지 평지 보행 연구에 비해 이에 대한 보고가 거의 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 평지 보행과 경사로 보행 동작을 동작분석기를 이용하여 시상면에서 운동형상학 측면 및 시공간학적 측면에서 비교 분석함으로써 경사로 보행 동작의 특성을 알아보고, 그 정상치를 제시하여 향후 여러 질환의 특징, 치료 계획의 수립 및 치료 효과 평가에 도움을 주고자 하였다.

연구대상 및 방법

1) 연구대상

10명의 25세에서 31세까지의 건강한 성인 남자를 대상으로 하였고 이들의 평균 나이는 29.7세였다. 특히, 현재 근골격계나 신경계의 질환을 앓고 있거나, 과거에 병력이 있는지를 면담이나 이학적 검사를 실시하여 이러한 질환이 의심되는 경우와 보행양상에 이상이 있는 경우는 제외하였다.

2) 연구방법

경사로 보행 동작 및 평지 보행 분석은 3차원 보행 분석

접수일: 2003년 5월 16일, 게재승인일: 2003년 10월 6일

교신저자: 노준래, 서울시 서대문구 신촌동 134

☎ 120-752

Tel: 02-361-7588, Fax: 02-363-2795

E-mail: jlroh@mdhouse.com

본 연구는 선도기술 의료공학기술개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임(HMP-98-G-3-061-A).



Fig. 1. A slope which was 1.0 m wide, 3.0 m long and from 10° to 20° for adjustable slope angle.

기인 Vicon 370 Motion Analysis System (Oxford Metrics Ltd., Oxford, U.K.)을 이용하여 운동형상학적 지표와 시공간학적 지표의 변화를 분석하였다. 경사로 보행과 평지 보행 순서는 무작위로 정하였으며 동일한 날짜, 동일한 시간에 시행하여 표식자 오류 등을 최대한 배제하고자 하였다. 평지 보행은 우선 8미터 길이의 보도를 수차례 걷게 하여 자연스러운 보행을 유도한 후 검사 동안 최소한 10차례 이상의 보행을 시도하였으며 보속은 피검자가 편하게 느끼는 속도로 시행하였다. 경사로 보행은 폭 1미터, 길이 3미터로 각도를 10도와 20도로 조절할 수 있게 제작된 경사로 면을 이용하여 수차례 경사로를 오르내리게 하여 자연스러운 경사로 보행 동작을 유도한 후 검사하는 동안은 최소한 10차례 이상 시행하여 분석하였다(Fig. 1).

3) 통계 처리

통계분석은 SPSS 10.0 for window version을 이용하였고 경사로 보행 동작과 평지 보행 간의 운동형상학적 지표는 independent t-test를 이용하여 분석하였다. P value가 0.05 미만인 것을 통계학적으로 유의 있는 것으로 정하였다.

결 과

1) 운동형상학적 지표 비교

(1) **족관절:** 경사로 보행 시 시상면에 대한 족관절 운동범위는, 20도 경사로 내려가기 동작 시 평균 30.35도였으며, 10도 경사로 내려가기 동작 시에는 평균 27.39도였다. 10도 경사로 올라가기 동작 시 운동범위는 평균 33.28도였으며, 20도 경사로 올라가기 시에는 평균 39.31도로 평지 보행 시의 평균 27.81도에 비해 올라가기 동작 시의 두 각도에서 모두 통계학적으로 의미 있게 증가된 소견을 보였다(Fig. 2).

경사로 보행 시 족관절의 최대 배굴각은 20도 경사로 내려가기 동작 시 평균 24.27도, 10도 경사로 내려가기 동작

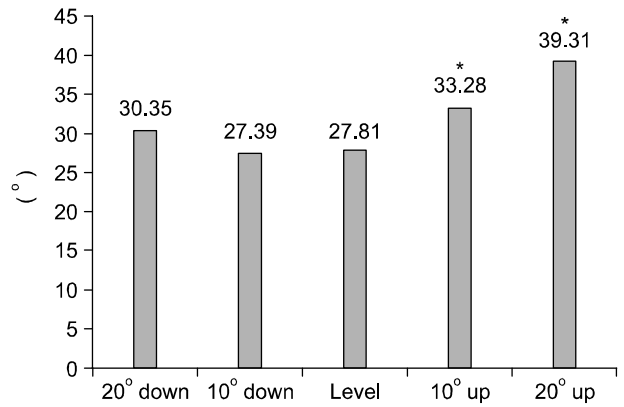


Fig. 2. Sagittal ranges of motion of ankle during level and ramp walking. *p < 0.05.

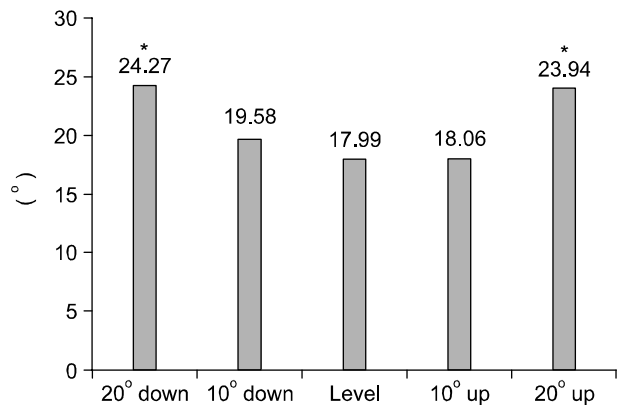


Fig. 3. Peak dorsiflexion angles of ankle during swing phase. *p < 0.05

시에는 평균 19.58도였다. 10도 경사로 올라가기 동작 시에는 평균 18.06도였으며, 20도 경사로 오르기 시에는 평균 23.94도였다. 평지 보행 시의 평균 17.99도에 비해 20도 내려가기와 20도 올라가기 동작에서 통계학적으로 의미 있게 증가되어 있었다(Fig. 3).

족관절의 최대 저굴각은 20도 경사로 내려가기 동작 시 평균 6.09도, 10도 경사로 내려가기 동작 시에는 평균 7.81도였다. 10도 경사로 올라가기 동작 시 평균 15.22도, 20도 경사로 오르기 동작 시에는 평균 15.37도였다. 평지 보행 시의 평균 9.83도에 비해 10도와 20도 오르기 동작 시 통계학적으로 유의있게 증가되어 있었다(Fig. 4).

(2) **슬관절:** 경사로 보행 시 시상면에 대한 슬관절 운동범위는, 20도 경사로 내려가기 동작 시 평균 61.30도였으며, 10도 경사로 내려가기 동작 시에는 평균 59.67도였다. 10도 경사로 올라가기 동작 시 운동범위는 평균 57.41도였으며, 20도 경사로 올라가기 시에는 평균 54.04도로 평지 보행 시의 평균 59.24도에 비해 경사로 보행 시 통계학적으로 유의 있는 차이는 보이지 않았으나 경사로를 올라갈 때 내려갈

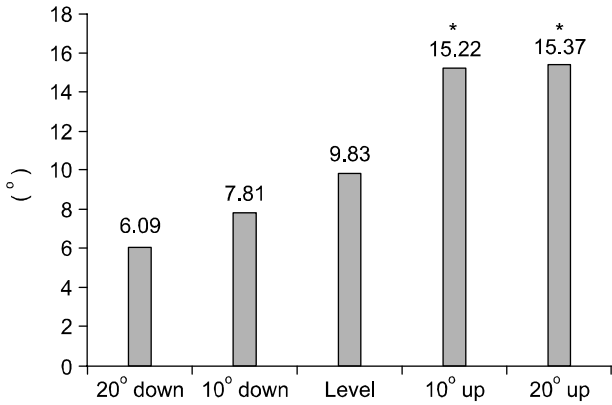


Fig. 4. Peak plantar flexion angles of ankle during terminal stance phase. *p<0.05.

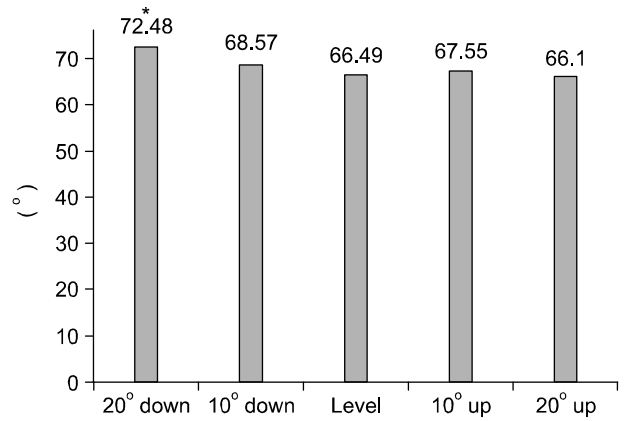


Fig. 6. Peak flexion angles of knee during swing phase. *p<0.05.

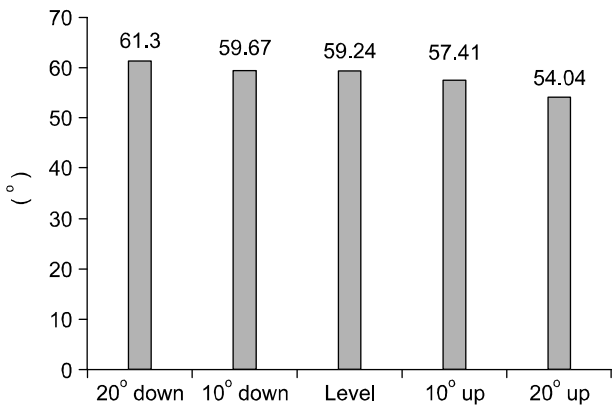


Fig. 5. Sagittal ranges of motion of knee during gait cycle.

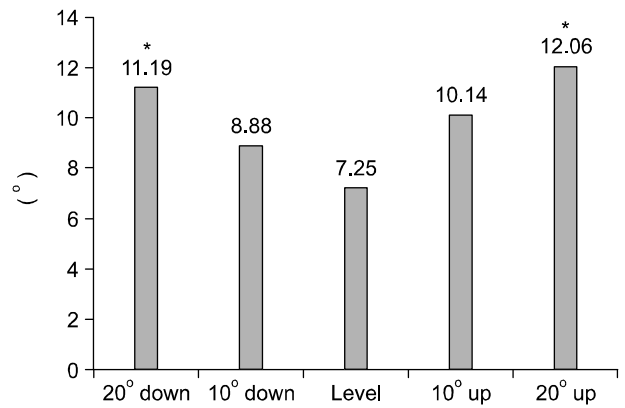


Fig. 7. Peak extension angles of knee during terminal stance phase. *p<0.05

때보다 관절가동 범위가 감소하는 추세를 보였다(Fig. 5). 경사로 보행 시 슬관절 최대 굴곡각은 20도 경사로 내려가기 시 평균 72.48도로 평지 보행 시 66.49도에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 소견을 보였으며, 이외의 동작 시에는 평지보행 시와 통계학적으로 유의한 차이를 보인 경우는 없었다(Fig. 6).

경사로 보행 시 슬관절의 최대 신전각은 20도 경사로 내려가기 시 평균 11.19도였으며, 10도 경사로 내려가기 시에는 평균 8.88도였다. 10도 경사로 올라가기 동작 시 최대 슬관절 신전각은 평균 10.14도였으며, 20도 경사로 오르기 시에는 평균 12.06도였다. 평지 보행 시의 평균 7.25도에 비해 오르기 20도와 내려가기 20도에서 통계학적으로 의미 있게 증가되어 있었다(Fig. 7).

(3) 고관절: 고관절의 시상면에 대한 관절운동 범위는 20도 경사로 내려가기 동작 시 평균 39.99도였으며, 10도 경사로 내려가기 동작 시에는 평균 43.36도였다. 10도 경사로 올라가기 동작 시에는 평균 54.92도, 20도 경사로 올라가기 동작 시에는 평균 63.60도였다. 이 중 평지 보행 시의 평균 47.07도에 비해 내려가기 20도와 올라가기 동작 10도, 20도

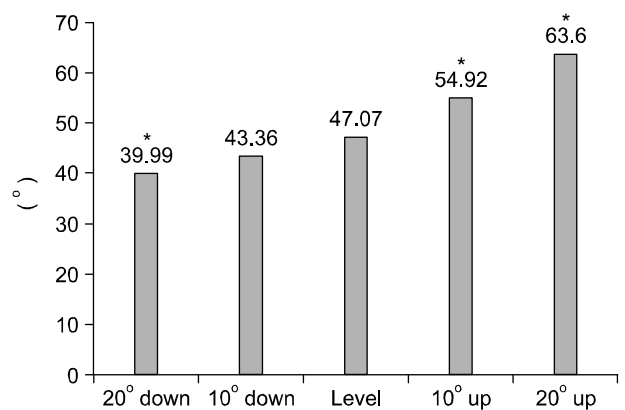


Fig. 8. Sagittal ranges of motion of hip during gait cycle. *p<0.05.

에서 통계학적으로 유의있는 차이를 보였으며, 내려가기 동작보다 올라가기 동작을 수행할 때 고관절의 시상면에서의 운동 범위가 증가하였다(Fig. 8).

경사로 보행 시 고관절의 최대 굴곡각은 20도 경사로 내

러가기 동작 시 평균 31.80도, 10도 경사로 내려가기 시에는 평균 34.04도였다. 10도 경사로 올라가기 동작 시에는 평균 45.00도였으며, 20도 경사로 오르기 시에는 평균 55.20도였다. 평지 보행 시의 평균 39.27도에 비해 내려가기와 올라가기 모든 동작에서 통계학적으로 유의있는 차이를 보였으며, 내려가기 동작보다 올라가기 동작 수행 시 고관절의 최대 굴곡각이 증가하였다(Fig. 9).

경사로 보행 시 고관절의 최대 신전각은 10도 경사로 올라가기 동작 시 평균 9.92도로 평지보행 시 신전각 8.77도에 비해 통계학적으로 유의있게 증가된 소견을 보였으며, 이외의 동작 수행 시에는 통계학적 차이를 보이지 않았다(Fig. 10).

2) 시공간학적 지표 비교(Table 1)

(1) 보속(cadence): 보속은 20도 경사로 내려가기 동작 시 평균 106.3 steps/min였으며, 20도 경사로 올라가기 동작 시에는 평균 101.6 steps/min이었다. 평지 보행 시의 보속은 103.6 steps/min로 경사각 감소 시 증가하고, 경사각 증가 시 감소하는 경향을 보였으나 통계학적으로는 유의있는 차이를 보이지는 않았다.

(2) 속도(speed): 속도는 20도 경사로 내려가기 동작 시 평균 1.13 m/sec였으며, 10도 경사로 내려가기 시에는 1.15

m/sec이었다. 10도 경사로 올라가기 속도는 평균 1.14 m/sec였으며, 20도 경사로 올라가기 시에는 평균 1.11 m/sec이었다. 평지 보행 시의 보속 평균 1.13 m/sec에 비해 경사각 변화 시 속도는 통계학적으로는 유의있는 변화가 없었다.

(3) 보폭(step length): 보폭은 20도 경사로 내려가기 동작 시 평균 62.5 cm였으며, 10도 경사로 내려가기 시에는 62.7 cm이었다. 10도 경사로 올라가기 보폭은 평균 63.2 cm였으며, 20도 경사로 올라가기 시에는 평균 61.9 cm이었다. 평지 보행 시의 보폭 64.1 cm에 비해 경사각 변화 시 보속은 통계학적 유의있는 변화는 없었으나, 평지 보행 시 경사로 보행에 비해 큰 경향을 보였다.

(4) 단하지지지기(single support): 단하지지지기는 20도 경사로 내려가기 동작 시 38.4%였으며, 10도 경사로 내려가기 동작 시 평균 37.5%였으며, 10도 경사로 오르기 시 단하지지지기는 평균 38.8%였으며, 20도 경사로 오르기 시에는 평균 38.6%이었다. 평지 보행 시의 단하지지지기 37.7%에 비해 경사각 변화 시 단하지 지지기에서 통계학적으로는 유의있는 차이는 없었다.

(5) 양하지지지기(double support): 양하지지지기는 20도 경사로 내려가기 동작 시 25.0%였으며, 10도 경사로 내려가기 동작 시 평균 26.8%였으며, 10도 경사로 오르기 시 양하

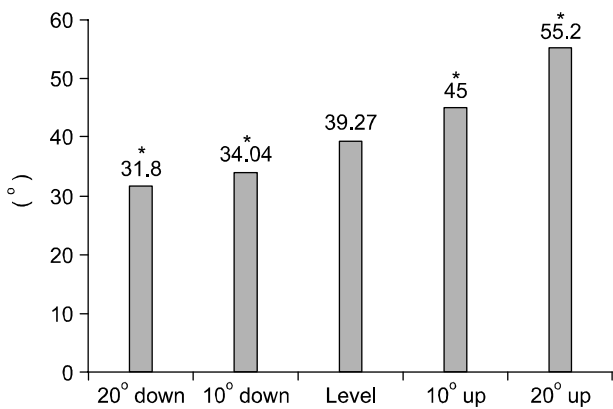


Fig. 9. Peak flexion angles of hip during swing phase. *p<0.05.

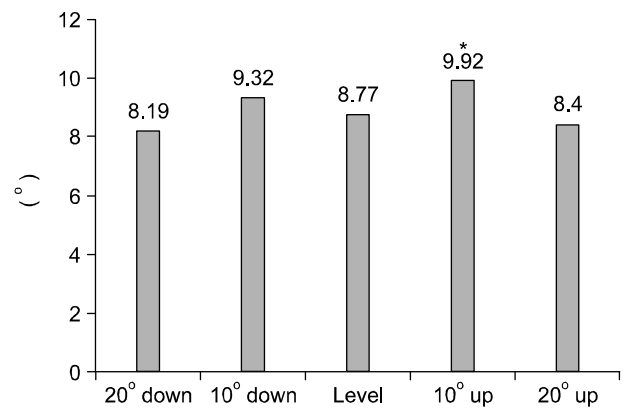


Fig. 10. Peak extension angles of hip during stance phase. *p<0.05.

Table 1. Comparison of Temporospacial Parameters between Level and Ramp Walking

	Cadence (steps/min)	Speed (m/sec)	Step length (cm)	Single limb support (%)	Double limb support (%)
20° down	106.3±5.7	1.13±0.11	62.5±6.3	38.4±2.5	25.0±3.9
10° down	106.4±6.6	1.15±0.10	62.7±4.7	37.5±2.8	26.8±2.8
Level	103.6±6.2	1.13±0.10	64.1±4.2	37.7±2.1	26.3±3.9
10° up	101.3±6.4	1.14±0.09	63.2±5.2	38.8±2.3	25.9±3.3
20° up	101.6±5.2	1.11±0.14	61.9±8.5	38.6±2.1	27.2±3.7

Values are mean±S.D.

지지지기는 평균 25.9%였으며, 20도 경사로 오르기 시에는 평균 27.2%이었다. 평지 보행 시의 단하지지지기 26.3%에 비해 경사각 변화 시 양하지 지지기에서 통계학적으로는 의미있는 차이는 없었다.

고 찰

경사로 보행 동작은 일상 생활을 하는 데 필수적인 동작으로 특히, 여러 가지 하지에 영향을 미치는 질환을 앓고 있는 환자에게는 매우 힘든 동작 중의 하나로 이런 경사로 보행 동작을 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요하다. 뇌졸중, 뇌성마비, 척수손상환자 등도 경사로 보행 동작은 매우 수행하기 힘든 동작 중의 하나로 경사로 보행 동작 분석은 그 적용 영역이 매우 넓다고 할 수 있다. 그러나 이러한 연구를 진행하기 위해서는 표준화된 경사로, 경사로 보행의 표준화된 방법과 표준치가 필수적이며 경사로 오르기 동작의 운동형상학적 이해가 매우 중요하다.

경사로 하향 보행 시의 운동형상학적 지표와 운동역학적 지표에 대한 연구는 경사로에서의 낙상의 위험성에 미치는 영향을 이해하는 데 매우 필수적이다. 미국 장애인 법령(Americans with Disabilities Act)의 도입에 따라 건물의 접근부에 경사로를 계단 대신 설치하도록 하는 등 경사로의 사용빈도가 증가하고 있다. 또한 최근 경사로에서 미끄러질 가능성은 경사로의 경사도와 지면의 마찰력과의 연관성이 높으므로 경사로를 내려갈 때의 지면 반발력에 대한 연구가 보고되고 있으며^{3,8)} 그외에 여러 연구 활동이 진행 중이다.

족관절 최대 배굴 각도, 최대 저굴 각도, 운동범위는 평지 보행에 비하여 경사면 보행 시 통계학적으로 유의한 차이를 보였다. Kuster 등⁶⁾의 연구에서 경사로 19도 하향보행 시 평지 보행에 비해 족관절의 최대저굴각이 8도 감소하는 소견을 보고하였으나, 본 연구에서는 감소하는 경향을 보였으나 통계적 의미는 없었다.

족관절의 가동 범위가 올라가기 동작에서 경사가 심할수록 증가하였으며, 이는 족관절의 배측굴곡 및 족저굴곡의 증가로 인한 것이며, 내려가기 동작에서는 전반적으로 족관절의 가동범위가 증가한 것은 족저굴곡의 증가가 아니라 족관절의 배측굴곡으로 인한 것임을 알 수 있다.

경사로 올라가기 동작에서 족관절의 족저굴곡과 고관절의 굴곡이 증가되고, 슬관절의 굴곡이 증가하지 않은 소견으로 보아 경사로 올라가기 동작에서는 주로 족관절과 고관절이 관여하는 것으로 생각된다. 경사로 내려가기에서 족관절 배측굴곡이 증가되고, 슬관절의 굴곡이 증가된 소견, 그리고 고관절의 굴곡이 감소된 소견으로 보아 내려가기 동작에서는 주로 족관절과 슬관절이 관여하는 것으로 생각된다.

슬관절 최대 굴곡 각도, 최대 신전 각도는 평지보행에 비

하여 경사면 보행 시 통계학적으로 유의한 차이를 보였다. Kuster 등⁶⁾의 연구에서 슬관절의 굴곡은 입각기 중반에 20도 이상, 초, 중반 유각기에 10도정도 하향보행 시에 증가하는 양상을 보였다. 슬관절의 최대 신전은 평지나, 경사로 하향 보행 시 모두 입각기 초기에 최대(11±5도) 값을 보였다.

슬관절의 관절 운동 범위는 올라가기 동작에서는 감소하는 경향을, 내려가기 동작에서는 증가하는 경향을 보였는데, 내려가기 동작 시 족관절의 족저, 배측굴곡이 증가한 소견은 슬관절의 굴곡이 20도 내려가기 동작에서 의미있게 증가되었기 때문으로 생각된다.

20도 경사로의 오르기와 내려가기 동작에서 각도가 증가함에 따라 의미있게 슬관절의 신전이 감소한 이유는 무게 중심을 낮추어 안정성을 유지하기 위한 것으로 생각된다.

고관절 최대 굴곡 각도, 최대 신전 각도, 운동범위는 평지 보행에 비하여 경사면 보행 시 통계학적으로 유의한 차이를 보였다. Wall 등¹²⁾의 연구에서 경사로 상향 보행 시 평지 보행에 비해 슬관절 굴곡의 증가와 고관절 굴곡의 감소 소견을 보였으나 골반의 회전에는 영향이 없다고 하였다. Kuster 등⁶⁾의 연구에서 고관절은 경사로 하향 보행 시 굴곡이 감소하는 소견을 보여 본 연구와 일치하는 결과를 보였다. Wall 등¹²⁾의 연구에서 슬관절과 고관절의 각도는 평지와 경사로 하향 보행 시에 차이를 보였는데, 슬관절의 경우 입각기의 후반부로 굴곡이 증가하며, 고관절의 굴곡이 주로 유각기에 감소한다고 하였다. 경사로 보행 시 고관절의 운동 양상은 올라가기 보행 동작에서는 고관절의 굴곡이 증가하는 소견을 보였는데 이는 올라가기 동작에서는 족관절의 배측굴곡이 증가하여 무게 중심이 몸의 전방에 위치하여 고관절의 굴곡이 증가하는 것으로 생각되며, 내려가기 보행 동작에서 고관절의 굴곡 각도가 작아진 것은 내려가는 관성에 대해 반작용을 하기 때문에 무게 중심이 몸의 후방으로 이동하여 고관절 굴곡이 감소한 것으로 생각된다.

시공간적 지표분석에서 보속은 하향 보행 시 증가하고 상향보행 시 감소하였으나, 통계학적으로 의미 있는 차이를 보이지는 않았다. Simpson 등¹¹⁾은 경사로 내려가기 동작 시에 -16%까지는 시공간학적 지표에서 정상보행에 영향을 주지 않는다고 하였으나, Wall 등¹²⁾은 -20% 경사로서는 보속의 증가 및 보폭의 감소를 보였다고 하였다.

하향 보행 시의 보폭과 보속의 적응에 대해서는 의견이 엇갈리고 있다. 보속을 제한하여 연구한 경우도 있으며, Wall 등¹²⁾의 경우와 같이 피검자가 보속을 결정하여 걸을 경우, 평지에 비해 10% 정도 보속이 감소하는 경향을 보였으며, 본 연구에서는 의미있는 속도의 차이를 보이지 않았다.

Kawamura 등⁵⁾은 보폭, 보속에 대해, 자율적 속도로 경사로를 내려 갈 때에 경사도가 증가할수록 감소한다고 보고하였다. McVay와 Redfern⁸⁾은 경사도와 보폭이 연관성이 없다고 보고한 바 있다. Treadmill을 이용한 Wall 등¹²⁾의 연구에서는 treadmill의 경사도가 증가할수록 보폭이 감소한다

고 하였다. 본 연구에서는 평지에 비해 경사로 올라가기 동작 시에는 분속수가 증가된 소견을 보였으며, 내려가기 동작에서는 분속수가 감소된 소견을 보였다.

Redfern과 DiPasquale¹⁰⁾의 연구에서 경사로 하향보행 시 경사도는 보속에는 영향을 주지 않았지만, 보행 주기는 경사도가 증가할수록 감소하였고, 보폭은 경사도가 -15도와 -20도에서 의미 있게 감소한다고 하였다.

본 연구의 제한점으로는 일정 연령의 동일한 성을 가진 피검자만을 대상으로 하였기 때문에 향후 각 연령 및 성별에 따른 경사로 보행 동작의 결과를 분석하여 표준치의 제공이 필요할 것으로 생각되며, 동적 근전도와 힘판을 같이 측정하지 않아 근육 또는 인대 등의 연부 조직에서 발생하는 모멘트를 정확히 설명하기 어렵다는 점, 그리고 다른 연구에서 이미 증명되었지만 재현성에 대한 연구가 되어 있지 않다는 점으로 역시 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각되며, 향후 경사로 보행 동작에 장애를 보이는 질환을 가지고 있는 환자에 대한 연구로 본 경사로 보행 동작 분석 방법이 실제적인 도움이 될 수 있는지, 또한 임상 증상과 경사로 보행 동작 분석 결과와 어떤 연관관계를 갖는지에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

결 론

본 연구는 10명의 20~30대 남자를 대상으로 하여 경사로 보행 동작과 평지 보행을 삼차원 동작분석기를 이용하여 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

정상성인의 경사면 보행은 운동형상학적 측면에서 평지 보행과 다른 양상을 나타냄을 관찰할 수 있었고, 시공간학적 측면에서는 의미있는 차이를 보이지 않았다. 이 결과로 향후 보행장애를 보이는 환자에서 경사면 보행 동작 분석에 도움을 줄 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

1) Andriacchi TP, Andersson GBJ, Fermier RW, Galante JO,

Stern D: A study of lower limb mechanics during stair-climbing. *J Bone Joint Surg* 1980; 62-A: 749-757

2) Benedict FG, Parmenter HS: The energy metabolism of women while ascending and descending stairs. *Am J Physiol* 1928; 84: 675-698

3) Buczec FI, Cavanagh PR, Kulakowski BT, Pradhan P: Slip resistance needs of the mobility disabled during level and grade walking. In: Gray BE, editor. *Slips, stumbles and falls: Pedestrian footwear and surfaces*, ASTM STP 1103, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990, pp39-54

4) Dean GA: An analysis of the energy expenditure in level and grade walking. *Ergonomics* 1965; 8: 31-47

5) Kawamura K, Tokuhiro A, Takechi H: Gait analysis of slope walking: a study on step length, stride width, time factors and deviation in the center of pressure. *Acta Med Okayama* 1991; 45: 179-184

6) Kuster M, Sakurai S, Wood GA: Kinematic and kinetic comparison of downhill and level walking. *Clin Biomech* 1995; 10: 79-84

7) McIntyre DR, Bruya LD, Eubank KM, Jackson AW: Gait characteristics of children during free ascent climbing performance. *Human Move Sci* 1982; 1: 201-214

8) McVay EJ, Redfern MS: Rampway Safety: Foot forces as a function of rampway angle. *Am Ind Hyg Assoc J* 1994; 55: 626-634

9) Ramanathan NL, Kamon E: The application of stair climbing to ergometry. *Ergonomics* 1974; 17: 13-22

10) Redfern MS, DiPasquale J: Biomechanics of descending ramps. *Gait Posture* 1997; 6: 119-125

11) Simpson KJ, Tant C, Shewokis P: Effects of velocity and gradient on temporal kinematics during downhill walking. In: *Book of abstracts, XIIIth ISB Congress on Biomechanics*, Perth, 1991, pp464-465

12) Wall JC, Nottrodt JW, Charteris J: The effects of uphill and downhill walking on pelvic oscillations in the transverse plane. *Ergonomics* 1981; 24: 807-816

13) Well R: The protection of the ground reaction force as a predictor of internal joint moments. *Bull Prosth Res* 1981; 18: 15-19