



트레드밀을 이용한 보행간 Variability 분석에 관한 연구

A Study on Stride-to-stride Variability by Treadmill Walking

최진승 · 강동원 · 탁계래* (건국대학교, 의공학실용기술연구소)

Choi, Jin-Seung · Kang, Dong-Won · Tack, Gye-Rae*

(Konkuk University, Research Institute of Biomedical Engineering)

ABSTRACT

J. S. CHOI, D. W. KANG, and G. R. TACK, A Study on Stride-to-stride Variability by Treadmill Walking, *Korean Journal of Sport Biomechanics*, Vol. 17, No. 4, pp. 1-8, 2007. The purpose of this study was to investigate the difference in the stride-to-stride variability between two treadmill conditions; traditional treadmill and special treadmill whose speed can be adjusted automatically by subject's walking speed. Eight male subjects (25.1 years, 172.7 cm, 66.6 kg) were participated in treadmill walking experiment. First, preferred walking speed (PWS) of each subject was determined. Second, each subject performed walking experiment with fixed PWS condition and with free PWS condition for 10 minutes. 3D motion capture system (Motion analysis Corp., USA) with 6 cameras was used to collect motion data with sampling frequency of 120Hz. Temporal and spatial variables for stride-to-stride variability were calculated. Coefficient of variance (CV) which quantifies the amount of variability and Detrended Fluctuation Analysis (DFA) which explains the structure (self-similarity) of the variability were used for analysis. Results showed that the amount of variability during free PWS condition was greater than that of fixed PWS condition. DFA results showed that there was a statistical difference between two treadmill conditions for the variables of step length, stance time, and double support time. From these results, it is possible that traditional treadmill study might give incorrect conclusion about gait variability study. Further study is necessary to clarify these matters by considering the number of subjects, experimental time, and gait variables for the study of stride-to-stride variability.

KEYWORDS : GAIT, TREADMILL, PREFERRED WALKING SPEED, VARIABILITY, FRACTAL ANALYSIS

I. 서론

인간의 보행에 관한 연구에 트레드밀이 많이 이용되고 있다. 트레드밀은 인간의 이동수단인 보행의 실험 시 발생하는 실험의 시간·공간적 제약으로부터 자유롭게 하고, 동작분석 시 필요한 고가의 카메라 등의 실험 장비를 최소화하도록 도움을 준다. 실험자가 원하는 속도와 경사의 조절이 간편하고 적은 수의 피험자를 통해 많은 수의 보행주기 데이터도 얻을 수 있다(Riley, Paolini, Croce, Paylo, & Kerrigan, 2007; Owings & Grabiner, 2003, 2004). 또 운동역학적 계산에 필요한 지면반발력의 측정을 위해 지면반발력 측정기가 설치된 트레드밀도 많이 이용되고 있다(Riley et al., 2007).

트레드밀을 사용하여 수행한 보행 연구를 살펴보면, 같은 속도에서의 보행과 주행에 따른 신체 각 분절각의 변화와 협응(coordination)을 살펴본 연구(Li, Bogert, Elizabeth, Caldwell, Graham, Emmerik, Richard, & Hamill, 1999), 보행-주행 변환속도(transition speed)의 결정에 대한 연구(Raynor, Yi, Abernethy, & Jong, 2002), 저크(jerk)를 이용한 육상선수과 일반인의 보행과 주행의 비교에 관한 연구(Hreljac, 2000), 보행 속도와 동작의 부드러움(smoothness)과의 관계에 관한 연구(탁계래, 한영민, 최진승, 이정환, 임영태, 전재훈, 박상균, Darren Stephanyshin, 및 박승하, 2006), 그리고 연령과 속도에 따른 보행주기의 시·공간차이변화 variability에 관한 연구(Jordan, Challis, & Newell 2007; Owings et al., 2004) 등으로 다양하다. 이러한 연구는 트레드밀 보행과 평지 보행이 유사한 운동특성이라는 전제하에 이루어졌다. 이러한 트레드밀의 이용이 실제 평지 보행 실험과의 어떠한 차이가 발생하는지에 대한 운동학적·운동역학적 연구가 진행된 사례도 있다. Alton, Baldey, Caplan 과 Morrissey (1998)의 연구에서 엉덩이 관절의 움직임 범위와 보행시간에 차이가 존재함을 밝혔고, 이는 익숙하지 않은 트레드밀 보행에 기인함으로 결론지었다. 그리고 Riley et al. (2007)의 최근 연구에서 트레드밀 보행에 충분히 적응된 정상적 성인의 경우에 평지 보행 환경에서와의 차이는 보행의 재현성 범위내로 매우 작게 존재한다고 하여, 두 경우가 상당히 유사하다

는 결론을 내렸다.

이러한 선행 연구의 경우, 운동학적·운동역학적 움직임의 범위의 고찰에 제한된 결과로, 신체의 자율적 균형조절의 표시라고 할 수 있는 보행 시 stride-to-stride variability의 연구에 있어서 그 활용에 약간의 의문점이 존재한다고 할 수 있다. 최근 보행 특성과 신체 균형에 대한 관점에서 지면반력의 variability의 주파수 분석을 통해 노인과 젊은 사람의 차이를 살펴본 연구(류지선, 2006), 장시간 보행을 통해 variability를 살펴본 연구(Hausdorff, Purdon, Peng, Ladin, Wei, 와 Goldberger, 1996)와 보행 속도에 따른 보행 시공간 간격 변인과 지면반력의 variability의 관계를 살펴본 연구(Jordan, 2007)등에 variability가 많이 이용되고 있다.

이러한 variability는 근골격계 시스템의 제어와 반응에서 발생하는 아주 작은 크기의 변동량(fluctuation)의 분석을 의미함으로 고정된 보행속도와 트레드밀환경에서의 실험은 이러한 변동량의 제약 요인으로 작용할 수 있다(Hausdorff, 2005). 이와 흡사한 경우로, 메트로놈 속도 제어 상태에서의 보행과 자유로운 보행시의 차이가 나타남을 살펴본 연구가 있었다(Hausdorff et al., 1996). 하지만 트레드밀에서의 속도가 자동으로 보행자에게 맞춰진다면 어떠한 차이를 나타낼 것인가에 대한 연구는 없었다. 트레드밀의 고정된 속도에서의 제약을 최소화하기 위해 Minetti, Boldrini, Brusamolín, Zamparo 및 Mckee (2003)은 초음파(ultra sonic) 거리 측정기를 이용하여 보행자의 가속도 변화에 따라, 동시에 속도 조절이 가능한 트레드밀의 이용을 시도한 바가 있다. 이에 본 연구에서는 variability 실험에서의 속도가 고정된 트레드밀과 속도의 자동 조절이 가능한 트레드밀에서의 보행 시 변동성의 관계에 대해 살펴보고자 한다. 본 연구 목적을 정리하면 다음과 같다.

1. 속도가 고정된 트레드밀(fixed speed treadmill)에서의 보행 시 variability를 살펴본다.
2. 피험자의 보행 속도에 따라 속도가 자동 조절되는 트레드밀(free speed treadmill)에서의 보행 시 variability를 살펴본다.
3. 1-2의 결과를 통해, variability 실험 시 트레드밀의 활용에 따른 영향에 대해 살펴본다.

위의 연구 목적을 살펴보기 위한 연구 가설은 다음과 같다.

H1) 두 실험 중, Free에서의 보행 시 variability의 폭이 Fixed보다 크게 나타날 것이다.

H2) H1)의 결과로 Free 보행에서 variability에 큰 차이를 보이는 변인이 발생할 것이다.

II. 연구방법

1. 실험개요

피험자의 보행 속도에 따라 속도가 자동 조절되는 트레드밀(RX9200S, TOBEONE, Korea)을 이용하였다. 본 트레드밀의 자동속도조절장치는 국내특허(제10-0737394호) 등록이 되어있고 국제 특허 출원(PCT/KR2006/004329)중에 있는 기술을 사용하여, Minetti et al. (2003)의 연구에서 개발된 초음파방식과는 다르게 로드셀을 이용하여 피험자의 하중전후위치에 따라 속도가 제어되는 방식이다. 먼저 각 피험자가 자유조절에 의해 유지하는 개인 보행 선호속도(Free)를 측정하였고, 이 속도의 평균속도를 이용해 고정된 조건(Fixed)의 보행을 실시하였다. 이를 통해 얻어진 variability 변인을 이용해 두 조건의 보행 variability를 비교하여 보았다.

2. 실험대상

본 실험에는 최근 1년간 하지 근골격계 질환 경력이 없고 정상적으로 보행을 하는 8명의 남자 대학생이 피험자(나이 25.1세, 키 172.7cm, 몸무게 66.6kg)로 선택되었다. 피험자에게는 실험 전에 실험 목적, 실험 내용 및 실험 참여시에 발생할지도 모르는 부상의 위험에 대해 충분히 설명하고 실험참가확인서에 서명을 받았다.

3. 실험내용

피험자는 각 실험에 앞서 트레드밀 조건에 적응할

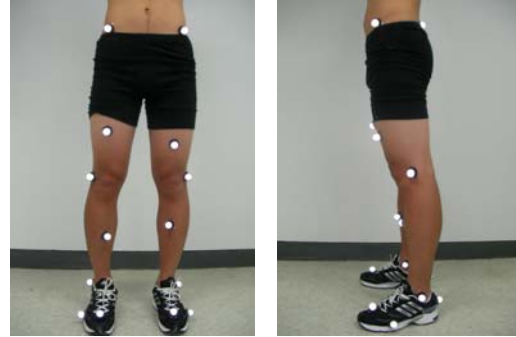


그림 1. (a)정면과 (b)측면의 마커 부착 위치

수 있는 충분한 시간이 주어졌다. 보행 시 피험자는 최대한 2.5m 정면의 빈 스크린의 중심을 응시하고 자신이 선호하는 속도로 꾸준히 걷도록 지시되었다. Free와 Fixed실험은 실내에서 Falcon 적외선 카메라 6대로 구성된 3차원 동작분석기(Motion Analysis Corp., USA)를 이용해 샘플링 주파수 120Hz로 신체 동작데이터를 획득하였다. 동작분석 시 사용된 마커의 부착위치는 다음과 같다 <그림 1>.

1) Free 실험

피험자의 보행 속도에 자동으로 동기화하여 동작 속도를 조절하는 트레드밀을 이용하여, 10분간 선호속도로 일정하게 보행을 실시하였다. 이 중 앞뒤의 각 1분을 제외한 8분의 보행데이터를 분석에 사용하였다. 이를 통하여 구해진 속도의 평균을 각 개인의 선호보행 속도(preferred walking speed, PWS)로 결정하였다.

2) Fixed 실험

Free 실험을 통해 구해진 PWS로 트레드밀 속도를 고정하여 보행을 실시하였다. 데이터의 이용은 Free와 같은 방법으로 8분간의 데이터만 사용하였다.

4. 분석방법

측정된 동작 데이터는 2차 0지연 Butterworth필터로 차단주파수 7Hz로 저역통과필터를 사용하여 급격한 변화의 데이터 수집 오차만을 제거하여 사용하였다. 최

표 1. 분석 변인

구분	상세 변인
시간변인	Stance Time (sec)
	Swing Time (sec)
	Stride Time (sec)
	Step Time (sec)
	Double Support Time (sec)
공간변인	Stride Length (m)
	Step Length (m)
	Step Width (m)

종적으로 얻어진 데이터는 O'Connor, Thorpe, O'Malley 와 Vaughan (2007)이 제안한 방법으로 보행 이벤트를 구하였다. 이를 통해 variability의 분석에 필요한 시간·공간적인 변화량이 존재하는 변인을 구하였다. 이에 사용된 변인은 <표 1> 과 같다.

Stride length와 Step length는 각 Stride time과 Step time을 구한 뒤, 트레드밀의 회전속도를 곱하여 첫 번째 Heel strike지점으로부터 각 Heel strike 시의 전후방향(anterior-posterior direction)의 ±위치이동량을 더하여 구하였다(Jordan et al., 2007). Step width는 한 발의 Heel strike와 이와 반대쪽 발의 Heel strike 시 내외방향(medio-lateral direction)의 거리로 결정하였다. 예외적인 자료를 제거하기 위하여, 각 변인데이터는 크기순으로 정렬한 후, 아래위 5%를 제외한 90%의 데이터를 이용하여 평균과 표준편차를 구한 후, 원래의 데이터의 값이 앞에서 구한 평균 ±3.77배의 표준편차 폭 이상으로 떨어진 데이터는 제외하였다(Owings et al., 2004).

두 실험의 변인들의 분석은 variability의 분포 분석에 많이 이용되는 분산계수 (CV, coefficient of variance)와 프랙털(fractal)적 특성을 나타내는 방법 중 하나인 DFA(detrended fluctuation analysis)의 power-law 그래프의 기울기 값(α)의 비교를 통해 살펴보았다(Peng et al., 1995). CV는 변인의 표준편차를 평균으로 나눈 값으로 데이터의 차원과는 상관없이 변화량의 크기의 정도를 비교할 수 있다. DFA는 긴 시간동안의 보행 데이터에서 변동량의 전체적인 상관관계의 특징을 나타낼 때 사용한다(Peng, Havlin,

Stanley, Goldberger, 1995 ; Hausdorff et al., 2005). 먼저, 이 방법은 다음 식을 통해 데이터의 오차합을 구한다. $I(i)$ 는 변인데이터, I_{avg} 는 변인의 평균치이다.

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [I(i) - I_{avg}]$$

이렇게 구한 오차합을 임의의 일정 구간별로 누적합을 구하는데, 본 실험에서는 누적을 위한 데이터 추출 범위를 4에서 $4/N$ (N =데이터의 총갯수)까지 늘려가며 아래의 수식을 이용하여 누적합을 구하였다. $y_n(k)$ 는 나눠진 구간 내의 데이터를 fitting한 대표값을 의미한다.

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2}$$

이렇게 구한 $F(n)$ 을 이용하여 power-law 그래프를 나타내고 이 그래프의 기울기 값(α)을 분석에 이용한다. 이 α 값의 범위가 0.5에 가까울수록 white noise와 같은 형태로, 0.5보다 크고 1보다 작으면 긴 시간범위에서의 상호연관성이 존재하는 것을 나타내고, 0.5보다 작으면 긴 시간범위에서의 상호연관성이 없는 것으로 추론할 수 있다. 여기서 1보다 큰 값이 발생할 경우, 긴 시간범위에서의 상호연관성은 있는 것으로 볼 수 있으나, 현재 사용한 Power-law의 관계를 가지지 않고 다른 상관관계를 가진다는 것을 의미한다. 기울기 (α)의 예는 <그림 2>와 같다(Hausdorff, Peng, Ladin, Wei, Goldberger, 1995; Jordan et al., 2007).

모든 데이터의 처리는 MATLAB™(Mathworks Inc., USA)을 사용하여 동작데이터로부터 실험 변인을 계산

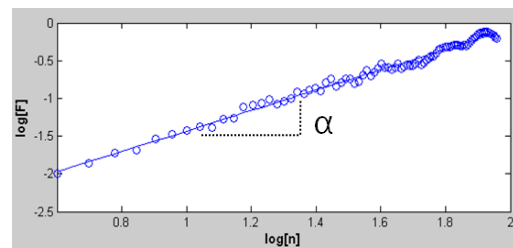


그림 2. DFA power-law의 기울기 (α)

표 2. 피험자별 PWS

피험자	1	2	3	4	5	6	7	8
속도 (km/hr)	4.0	2.9	3.9	3.1	4.6	4.1	3.2	4.2

하였고, 이 변인을 이용하여 평균, CV, DFA의 계산과 분석을 수행하였다. 구하여진 변인별 실험 결과는 통계 분석프로그램인 SPSS™ 12.0k (SPSS Inc., USA)를 이용해 두 조건(Free, Fixed)의 차이에 대한 동일 피험자의 반복측정 t-검정으로 분석하였다. 유의수준은 양방향검정으로 $p<0.05$ 과 $p<0.01$ 로 살펴보았다.

III. 결과 및 논의

<표 2>는 피험자별 PWS를 구한 것이고, 속도가 자유로운 보행(Free)과 고정된 속도에서의 보행(Fixed) 실험의 평균, CV, DFA의 결과는 표 3, 4와 같다. 표 3에 나타난 바와 같이 각 변인의 평균값은 두 실험 조건의 대부분의 변인에서 흡사하고, Stride length에서만 통계적으로 유의하지는 않으나 비교적 차이가 보였다 ($t=1.417$, $p=0.178$). 이와 달리, 변인의 변동량의 크기를 비교할 수 있는 CV값의 경우, Free의 모든 변인에서 더 크게 나타났다. 특히 보행의 시간에 따른 variability가 일반적으로 평지보행에서 'CV \approx 3%'의 주변에 존재한다는 선행연구(Hausdorff et al., 1996)와 본 실험의 경우, 트레드밀에서의 Free에서 비교적 유사

하게 나타났다. 하지만 본 실험에서의 공간적 변인에서는 선행 연구의 CV값보다 다소 크게 나타났다(Jordan et al., 2007). 본 실험 결과 중 선행 연구와 유사한 값으로 나타난 시간변인을 먼저 살펴보면 Free의 경우의 변동폭이 Fixed의 경우보다 크고 일반적인 평지 보행 패턴에 가까운 것을 유추할 수 있다. 이러한 CV값의 차이는 공간변인인 Step length에서 통계적으로 유의한 차이가 나타났고, Stance time($t=1.914$, $p=0.076$)과 Double support time($t=2.068$, $p=0.058$)에서도 통계적으로 유의하지는 않으나 비교적 눈에 띄는 차이를 보였다. 이는 PWS로 유사한 보행 속도에서의 Free와 Fixed의 경우에 보행 시간 변인과 거리 변인에 있어서 변동의 폭에 차이가 나타난다는 것을 의미한다. 이러한 결과로 보아 가설 H1)의 예상대로 Free의 경우에 보행변인의 변동폭이 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. CV에서 차이를 보인 세 가지 변인(Step length, Stance time, Double support time)은 DFA를 통해 살펴본 Fractal pattern에서 모두 통계적으로 유의한 차이를 보였고($p<0.05$), 특히 Step length와 Double support time에서는 그 차이가 확연히 나타났다($p<0.01$). 다른 변인들의 DFA결과는 Stride length를 제외하고는 모두 Free의 경우가 더 컸으나 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. Stride length의 경우에 유일하게 Fixed의 경우가 크게 나타났으나, 크기가 1이 넘게 나타나 긴 시간에 대한 상관관계를 가진다고 생각할 수 있으나, DFA를 이용한 Power-law관계의 비교가 되지 못했다. 또, 본 실험에서 Step width의 CV값이 일

표 3. 분석변인별 평균, CV, DFA 결과

		Mean		CV		DFA	
		Free	Fixed	Free	Fixed	Free	Fixed
Temporal Variables	Stance time	0.76	0.75	2.51	1.90	0.88	0.72 *
	Swing time	0.41	0.41	2.10	1.94	0.78	0.70
	Stride time	1.17	1.16	1.92	1.51	0.90	0.82
	Step time	0.58	0.58	2.60	2.21	0.84	0.74
	Double support time	0.17	0.17	6.73	5.45	0.79	0.57 **
Spatial Variables	Stride length	1.17	1.30	5.52	4.75	1.04	1.23
	Step length	0.56	0.56	4.47	2.11 **	0.99	0.74 **
	Step width	0.01	0.01	67.34	64.54	0.52	0.50

(* : $p<0.05$, ** : $p<0.01$)

표 4. 분석변인별 평균, CV, DFA 통계치

		Mean		CV		DFA	
		t	p-value	t	p-value	t	p-value
Temporal Variables	Stance time	0.093	0.927	1.914	0.076	2.863	0.013 *
	Swing time	0.672	0.513	0.490	0.632	1.615	0.129
	Stride time	0.252	0.804	1.306	0.213	1.391	0.186
	Step time	0.167	0.870	0.991	0.338	1.417	0.178
	Double support time	0.000	1.000	2.068	0.058	5.597	0.000 **
Spatial Variables	Stride length	-1.417	0.178	0.840	0.415	-2.022	0.063
	Step length	0.059	0.954	3.575	0.003 **	3.488	0.004 **
	Step width	0.000	1.000	0.233	0.819	0.462	0.651

(* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)

반적인 보행 변인의 변동폭에 비해 상당히 크게 나타난 것은 그 측정 단위, 즉 변동의 폭이 다른 변인들과는 달리 작은 크기에서 큰 크기로의 변화가 발생하게끔 되기 때문으로 사료된다. 또 이는 DFA의 결과가 0.5 근처의 값으로 우연에 의한 결과, 즉 white noise로 볼 수 있다. 결과에서 나타난 바와 같이 variability 데이터는 평균값의 차이가 나타나지 않더라도 CV값에서 기준이 다른 데이터의 분포를 어느 정도 variability의 단순한 양적인 차이로 살펴볼 수 있었으며, fractal 분석 기법인 DFA를 통해 variability 데이터가 가지는 의미를 확인할 수 있었다. 이는 본 실험과 같은 variability의 연구에서는 데이터의 평균과 표준편차를 통한 데이터의 개략적인 비교와 더불어 CV값을 이용한 데이터의 변동량을 살펴보고, DFA와 같은 fractal 차원의 분석방법을 통해 그 데이터의 구조적 측면에서의 자기유사성(self-similarity)을 살펴볼 수 있었다.

이러한 결과들을 종합해 보면, CV의 크기가 변동의 총량을 의미함에 따라, Free 보행 시 그 변동폭이 더 크게 나타났고 Fixed의 경우에 일정하게 고정된 트레드밀의 속도 때문에 각 변인의 변동량에 제약이 발생함을 유추할 수 있다. 또, Free와 Fixed의 두 조건 모두 선행연구에서 평지보행의 CV값보다 작아서 변동량이 보다 줄어든 것을 생각해 볼 수 있겠다. 두 조건의 CV값에서의 차이에 대해 DFA의 결과를 살펴보면, Free에서 CV값이 더 크게 나타났지만, α 값으로 살펴본 긴 시간에서의 상관관계가 대체적으로 Free에서 더

크게 나타났다(Peng et al., 1995). 이 중에 Stance time과 Double support time, Step length에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 이는 α 값이 variability를 일으키는 구조에 대한 의미를 띠는 전제하에(Jordan et al., 2007), 보행의 동작형태는 바로 이전에 발생한 동작에 의한 즉각적 변동이 큰 것으로 보이지만, 실제적으로 긴 시간에 대한 상관관계가 높다고 하는 것은 신체의 보행 조절과 관련해 변동의 시간적 전후관계에서, 자기유사성을 가지고 움직인 결과로 생각할 수 있다(Hausdorff et al., 1996). 보행의 일정함을 유지하기 위한 속도에 따른 보행 조절의 Fractal pattern은 현재 분석의 DFA를 통한 상관관계의 실험 조건간의 상대비교는 할 수는 없었으나, 긴 시간에 대한 관계가 존재하는 것은 알 수 있었던 Stride length로 나타날 수 있고, 이는 Stance time과 Double support time, Step length의 변인 크기가 자율 조절되어 형성된다고 유추해 볼 수 있다. 이러한 변인은 가설 H2)에서 가정한 변인으로 이 세 변인을 생각해 볼 수 있다. 즉, 일반적으로 평지 보행에서 피험자의 Stance time과 Step time, Double support time을 통한 Stride length의 조절에 의해 보행이 이루어지나, 속도가 고정된 트레드밀에서의 보행은 이러한 조절 능력을 일정한 패턴에 맞춰진 보행의 유사성을 갖도록 하여 보행 특유의 자율성을 제약한다고 판단할 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 보행실험에 흔히 이용되는 트레드밀의 이용에 있어서, 보행의 variability에 대한 연구에 사용 시 일반적인 속도 고정식 방식과 자율조절 방식의 트레드밀의 이용이 보행의 변동성 실험에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 그 결과, Stance time과 Double support time, Step length에서 CV와 DFA의 양쪽 모두에서 차이가 발생함을 알 수 있었고, 이러한 속도의 자율조절과 고정의 여부에 따른 트레드밀 보행에서의 variability 차이는 Dingwell, Cusumano, Cavanagh 와 Sternad(2001)의 연구 결과에서 나타난 바와 같이 variability 연구 시 잘못된 결과와 오류를 만드는 요인으로 작용할 수도 있다. 따라서 variability에 대한 연구 수행 시, 트레드밀의 이용 시 큰 주의가 필요하고, 공간적 제약, 속도의 조절 등으로 인해 사용할 경우에 실험의 설계에 대한 추가적 고려요인으로 작용할 것으로 사료되고, 이에 대한 고려요인과 연구 방안에 대한 추가적 고찰이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- 류지선 (2006), 노인 보행 시 지면 반력의 주파수 비교, **한국체육학회지 자연과학편**, 제45권, 제5호, p457-464.
- 탁계래, 한영민, 최진승, 이정환, 임영태, 전재훈, 박상균, Darren Stephanyshin, 박승하 (2006), 보행속력과 동작의 부드러움과의 상관관계에 관한 연구, **한국운동역학회지**, 제16권, 제1호, p11-17.
- Alton, F., Baldey, L., Caplan, S., Morrissey, M. C. (1998), A kinematic comparison of overground and treadmill walking, *Clinical Biomechanics*, 13(6), 434-440.
- Dingwell, J. B., Cusumano, J. P., Cavanagh, P. R., Sternad, D.(2001), Local Dynamic Stability Versus Kinematic Variability of Continuous Overground and Treadmill Walking, *Journal of Biomechanical Engineering*, 123(1), 27-32.
- Hausdorff, J. M., Peng, C. -K., Ladin, Z., Wei, J. Y., Goldberger, A. L.(1995), Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait, *Journal of Applied Physiology*, 78(1), 349-358.
- Hausdorff, J. M., Purdon, P. L. Peng, C. K., Ladin, Z., Wei, J. Y., Goldberger, A. L.(1996), Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuations, *Journal of Applied Physiology*, 80(5), 1448-1457.
- Hausdorff, J. M. (2005), Gait variability: methods, modeling and meaning, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2, 19.
- Hausdorff, J. M. (2007), Gait dynamics, fractals and falls: Finding meaning in stride-to-stride fluctuations of human walking, *Human Movement Science*, 26(4), 555-589.
- Hreljac, A. (2000). Stride smoothness evaluation of runners and other athletes, *Gait & Posture*, 11, 199-206.
- Jordan, K., Challis, J. H., Newell, K. M. (2007), Walking speed influences on gait cycle variability, *Gait & Posture*, 26(1), 128-134.
- Li, Li, van den Bogert, Elizabeth C. H., Caldwell, Graham E., van Emmerik, Richard E. A., Hamill, Joseph (1999), Coordination patterns of walking and running at similar speed and stride frequency, *Human Movement Science*, 18, 67-85.
- Minetti, A. E., Boldrini, L., Brusamolin, L., Zamparo, P. and McKee, T. (2003), A feedback-controlled treadmill (treadmill on demand) and the spontaneous speed of walking and running in humans, *Journal of Applied Physiology*, 95, 838-843.
- O'Connor, C. M., Thorpe, S. K., O'Malley, M. J., Vaughan, C. L. (2007), Automatic detection of gait events using kinematic data, *Gait & Posture*, 25, 469-474.

- Owings, Tammy M., Grabiner, Mark D. (2003),
Measuring step kinematic variability on an
instrumented treadmill: how many steps are
enough? *Journal of Biomechanics*, 36(8),
1215-1218.
- Owings, Tammy M., Grabiner, Mark D. (2004),
Variability of step kinematics in young and
older adults, *Gait & Posture*, 20(1), 26-29.
- Peng, C. -K., Havlin S., Stanley, H. E., Goldberger, A.
L.(1995), Quantification of scaling exponents
and crossover phenomena in nonstationary
heartbeat time series, *Chaos*, 5, 1, 82-87.
- Raynor, A. J., Yi, C. J., Abernethy, B., Jong, Q. J. (2002),
Are transitions in human gait determined by
mechanical, kinetic or energetic factors?
Human Movement Science, 21, 785-805.
- Riley, P. O., Paolini, G., Croce, U. D., Paylo, K. W.,
Kerrigan, D. C. (2007), A kinematic and
kinetic comparison of overground and
treadmill walking in healthy subjects. *Gait &
Posture*, 26(1), 17-24.

투 고 일 : 10월 25일

심 사 일 : 11월 6일

심사완료일 : 12월 3일