



보행속력과 동작의 부드러움과의 상관관계에 관한 연구 Relationship between Walking Speed and Smoothness of Movement

탁계래 · 한영민 · 최진승 · 이정환 · 임영태 · 전재훈* (건국대학교)

박상균 · Darren Stephanyshin (University of Calgary) · 박승하 (이화여자대학교)

Tack, Gye-Rae · Han, Young-Min · Choi, Jin-Sung · Yi, Jeong-Han · Lim, Young-Tae · Jun, Jae-Hoon* (Konkuk University), Park, Sang-Kyoon · Stefanyshin, Darren (University of Calgary) · Park, Seung-Ha (Ewha Womans University)

ABSTRACT

G. R. Tack, Y. M. Han, J. S. Choi, J. H. Yi, Y. T. Lim, J. H. Jun, S. K. Park, D. Stephanyshin, S. H. Park, Relationship between Walking Speed and Smoothness of Movement. Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 16, No. 1, pp.11-17, 2006. The purpose of this study was to evaluate the smoothness of movement during various walking speeds. Based on the maximum smoothness theory (or the minimum jerk theory), we hypothesized that the walking speed at the maximum smoothness (or minimum normalized jerk) is the same as that at the minimum energy consumption. Eleven university students participated in treadmill walking experiment with 11 different walking speeds (1.11, 1.19, 1.25, 1.33, 1.56, 1.78, 1.9, 2, 2.11, 2.33, and 2.47m/sec). Normalized jerk at 15 markers and the center of mass was calculated. Results showed that there existed a quadratic relationship between the normalized jerk of the vertical direction at the center of mass and the walking speed. As the walking speed increased, the normalized jerk of all directions at the heel decreased. Our hypothesis that the previously published energetically optimal walking speed (1.25 ~ 1.4m/s) is the same as the minimum jerk speed (1.78m/s) did not agree with this result. The minimum normalized jerk at the center of mass occurred at the walking speed of 1.78m/s which was the preferred walking speed by subjects' questionnaires. Further studies concerning the energetically optimal walking speed, preferred walking speed, and walk-run transition speed or run-walk transition speed are necessary based on actual energy consumption experiment and various multi-dimensional analysis.

KEYWORDS: GAIT ANALYSIS, SMOOTHNESS, JERK, MINIMUM-JERK THEORY.

I. 서론

일반적으로 인간은 최소한의 에너지로 가장 효율적인 움직임을 얻고자 한다고 알려져 있다. 우리가 일상적으로 걸을 때 무의식적으로 가장 편한 걸음으로 걷게 되는데 이것을 '최적의 보행속력(optimal walking speed)'이라고 하며 이때의 보행속력에서 최적의 보폭 빈도를 얻을 수 있다. 이러한 최적의 보폭빈도를 가지는 보행속력에서 최소 에너지를 얻을 수 있다고 하였다 (Zarrugh 1974). 에너지 소비의 관점에서 볼 때 최적의 보행속력 이외에 중요한 속력은 보행에서 주행으로 혹은 주행에서 보행으로 보행패턴이 바뀌는 전이속력(transition speed)라는 것이 있다. Corcoran(1970), Rose(1990) 등은 보행 시에 거리 당 산소소비량을 통해서 최적의 보행속력을 찾아냈다. 과거의 많은 연구자들 (Carrier, 1984; Cavagna et al., 1976; Hreljac et al., 1993; Minetti, 1998)은 실험을 통하여 보행에서의 신진 대사량(metabolic cost, VO_2)이 최소가 되는 지점의 속력은 1.25m/s ~ 1.4m/s 부근이라고 하였다. 또한 실험 (Hreljac et al. 1993; Saibene 2003)을 통하여 보행에서 주행으로 변하는 선호전이속력(preferred transition speed)을 약 2.0m/s ~ 2.3m/s 라고 찾아냈다. 보행에서 주행으로 변할 때의 전이 현상은 주행에서 보행으로 변할 때의 전이 현상보다 더 높은 속력에서 발생한다고 알려져 있다 (Saibene 2003).

보행을 에너지 소비의 관점에서 보는 방법 이외에 부드러움(매끄러움, smoothness)의 관점에서 본 연구도 있다 (Hreljac, 1993, 2000). 일반적으로 자연스러운 동작은 부드러운 동작이라고도 할 수 있다. 그리고 동작의 부드러움을 이용하여 주어진 동작의 숙련도를 분석하고자 하는 시도도 많이 있었다. 부드러움을 정량적으로 측정하는 변수로는 주로 저크(jerk)가 많이 사용된다. 저크는 위치좌표를 시간에 대하여 3번 미분한 값이다. 저크-비용함수(jerk-cost function) 혹은 정규저크(normalized jerk)를 이용하여 동작의 부드러움을 정량화할 수 있다. 이 양은 주어진 시간 동안에 발생한 저크의 제곱을 시간에 대하여 적분한 값으로 정의되어 사용된다. 최대 스무드니스이론(maximum smoothness

theory) 혹은 최소저크이론(minimum jerk theory)에 따르면 일반적으로 동작의 궤도 끝점(the end point of motion trajectory)에서 저크-비용함수를 최소화하면서 동작이 이루어진다고 하였다 (Viviani, 1995; Hreljac, 2000).

지금까지 저크를 이용하여 다양한 운동의 부드러움에 관한 연구가 수행되었다. Hreljac(1993)는 장애물을 피할 때 하체 움직임의 부드러움과 숙련도(움직인 시간으로 나타냄)의 상관관계에 관한 연구를 저크-비용함수를 이용하여 정량적으로 설명하였다. 이 연구를 통하여 숙련도가 증가할수록 동작이 부드러워진다는 것을 보여주었다. Hreljac와 Martin(1993)은 피험자가 선호하는 속력으로 보행 시 저크-비용함수(부드러움)와 VO_2 (신진 대사량)가 서로 약하지만 통계적으로 유의한 음의 관계를 가지는 것을 보여주었다. 이것은 보행 시 부드러움과 보행 시 경제성이 서로 보완적인 성능평가기준이 아니라는 것을 의미한다고 할 수 있다. Hreljac (2000)은 최근의 연구에서 달리기 선수와 일반인의 주행과 빠른 보행 시 부드러움을 나타내는 정량적인 변수로는 뒤꿈치에서의 저크-비용함수를 사용하여야 한다고 하였다. 이는 최대 스무드니스이론과 일치하는 즉 동작의 끝점에서의 저크를 계산하여야 하는 것을 다시 한 번 보여주었다.

하지만 이와 같은 다양한 종류의 보행에 따른 부드러움의 변화, 에너지 소비량의 변화에 관한 연구에도 불구하고, 본 연구진이 조사한 바에 따르면 저크나 동작의 부드러움의 관점에서 속력의 변화에 따른 보행분석에 관한 연구는 보고된 적이 없다는 것을 발견할 수 있었다. 위의 논문들의 대부분은 피험자가 선호하는 보행속력을 이용한 실험이다. 본 연구에서는 최대 스무드니스이론과 최소저크이론에 기초를 두어 최소저크가 발생하는 보행속력에서 에너지 소비가 가장 작을 것이라고 가정하였다. 따라서 본 연구에서는 위의 가정을 검증하기 위하여 트레드밀에서의 다양한 보행 속력의 변화에 따른 보행시의 부드러움을 정규저크를 이용하여 분석하고자 하였다. 최소저크이론에 따르면 동작의 끝점인 뒤꿈치에서의 저크만 고려하면 되지만, 인체의 에너지 소비량은 무게중심의 움직임과 밀접한 관계가 있기 때문에, 본 연구에서는 인체의 무게중심과 뒤꿈치

에서의 저크의 변화를 통하여 부드러움을 정량화하고 최적보행속력과 비교, 분석하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 실험대상

본 실험은 성인 남자 20대 남성 11명(나이 24.5 ± 1.44 , 키 173.4 ± 3.1 cm, 몸무게 69.4 ± 7.3 kg)이 참가하였다. 피검자는 골관절 질환, 심질환, 호흡기계 질환이 없는 건강한 남성으로 하였다. 피검자에게는 실험 전에 실험 목적, 실험 내용 및 실험 참여시에 발생할지도 모르는 부상의 위험에 대해 충분히 설명하고 실험참가확인서에 서명을 받았다.

2. 실험방법

본 실험에서의 보행속력은 트레드밀(IMAGE 760, ICON Health & fitness, USA) 속력의 1.11, 1.19, 1.25, 1.33, 1.56, 1.78, 1.9, 2, 2.11, 2.33, 2.47m/sec를 이용하였다. 각 트레드밀 속력은 반복효과와 이월효과를 제거한 통계적인 방법으로 피검자에게 주어졌으며 실험참여자들은 보행속력실험에 앞서 실험에서 요구하는 트레드밀 속력에 익숙해지도록 보행을 반복하였다. 보행속력은 트레드밀과 3차원 동작분석 시스템을 사용하여 측정 및 계산하였다. 보행 중 피검자의 위치를 측정하기 위해서 삼차원 동작 분석 시스템(Motion Analysis Corp., Santa Rosa CA, USA)을 사용하였다. 이 시스템은 4대의 카메라(high-speed Falcon digital motion capture camera)로 구성되어있다.

4대의 적외선 카메라는 피검자에게 부착된 마커의 움직임을 120Hz로 샘플링 하였다. 인체의 무게중심과 보행 중의 정확한 위치를 추적하기 위하여 15개의 반사마커를 피검자의 오른쪽 하지에 부착하였다. 부착된 상세한 위치는 다음과 같다. 신발 두군데(바깥 측(Heel), 위측(metatarsal)), 발목(lateral malleolus), 정강이(shank), 허벅지(thigh), 오른쪽앞엉덩이뼈가시(right anterior superior iliac spine), 왼쪽앞엉덩이뼈가시(left anterior superior iliac spine), 5번 요추(5 th lumbar spine).

3. 분석방법

측정된 데이터는 2차 0지연 Butterworth 필터(2nd order zero-lag Butterworth filter)를 사용하여 잡음을 제거하였다. 최적 차단 주파수(optimal cutoff frequency)는 Wells(1980) 등이 제안한 나머지 방법(the residual method)을 이용하여 계산하였다. 잡음을 제거할 때 사용된 차단주파수는 개인, 속도, 실험 횟수가 바뀔 때 따라 개별적으로 이 방법을 적용했기 때문에 각기 틀리게 계산된다. 속도, 가속도, 저크를 구하기 위해 일차, 이차, 및 삼차미분은 차분방정식(finite difference equation)에 의하여 계산하였다. 특히 미분 시에 발생하는 오차의 확대를 최소화하고자 하였다. 미분이 먼저냐 잡음제거를 위한 필터링이 먼저냐 하는 순서는 Giakas와 Baltzopoulos(1997)가 제안한 방법을 이용하여 저크의 계산에서 발생하는 오차를 최소화하였다. 각 보행속력 실험에서 한 걸음(stride)을 입각기(stance phase)와 유각기(swing phase)로 나뉘어 분석하였다. 주어진 보행 자료에서 입각기와 유각기를 구별하는 방법은 일반적으로 힘측정판을 이용하는 것이다. 본 연구에서는 운동변수만을 이용하여 입각기와 유각기를 구별하는 Hreljac와 Marshall(2000)이 제안한 방법을 이용하였다.

저크는 위치벡터를 시간에 대하여 3 번 미분하여 얻을 수 있다. 부드러움을 정량적으로 측정하기 위한 저크-비용함수(JC, Jerk-Cost function, 단위: $m2s^{-5}$)는 다음과 같이 정의된다.

$$JC = \int_0^T \left(\frac{d^3 r}{dt^3} \right)^2 dt$$

여기에서 T는 전체 동작에 걸리는 시간이며, r은 위치벡터이다. 피검자의 체형에 대한 위치좌표의 변화 및 보행시간 변화에 대한 고려가 필요하기 때문에 저크-비용함수를 정규화 하는 것이 필요하다. 정규저크(NJ, normalized jerk, 단위: 무차원)는 다음의 식으로 정의된다.

$$NJ = \sqrt{\frac{1}{2} \int_0^T \left(\frac{d^3 r}{dt^3} \right)^2 dt} \cdot \frac{T^5}{L^2}$$

위에서 언급한 바와 같이 T는 전체 동작에 걸리는 시간, L은 주어진 시간동안 움직인 거리를 나타낸다. 각 마크에서의 저크성분은 x, y, z 방향성분을 가진다. 본 연구에서 x방향은 보행 시 전후(anterior-posterior) 방향, y 방향은 내외(medio-lateral) 방향, z 방향은 수직(vertical) 방향으로 정하였다. 각 방향성분을 이용하여 합성성분(resultant component)도 구하였다. 최소저크이론에 따르면 동작의 궤도의 끝점에서의 정규저크를 계산하면 충분하나, 보행 중의 에너지 소비량은 인체의 무게중심의 움직임과 밀접한 관계가 있기 때문에 본 연구에서는 뒤꿈치와 무게중심에서의 정규저크에 관심을 두었다. 인체의 무게중심(COM, center of mass)을 구하는 방법으로는 천골중심(COP, center of pelvis) 방법을 사용하였다. 양쪽 천골마커 2개와 5번 요추마커 1개를 사용하여 3차원 무게중심좌표를 찾아낸다.

모든 자료는 MATLAB™ v6.5 (Mathworks Inc., USA)을 사용하여 분석하였다. 보행속력에 따른 정규저크의 변화량과 각 마커에서의 차이점 등의 통계적 분석을 위하여 통계분석프로그램인 SPSS™ 12.0k (SPSS Inc., USA)를 사용하여 회귀분석을 수행하였다.

III. 결과 및 논의

본 연구에서는 부착된 15개와 계산된 무게중심에서 즉 16개의 인체의 주요 부위에서 방향별로는 전후(anterior-posterior), 내외(medio-lateral), 수직(vertical), 그리고 3방향의 벡터의 합력방향(운동 진행방향)으로 정규저크를 계산하였다. 또한 보행주기별로는 입각기(stance phase), 유각기(swing phase), 전체보행기(stride phase)로 나누어 계산하였고, 입각기는 한발지지기와 두발지지기로 세분하여 계산하였다. 계산된 부위별, 방향별, 주기별 정규저크의 조합은 320 (16 x 4 x 5) 이다.

뒤꿈치에 대한 정규저크는 속력이 증가할수록 입각기와 전체보행기에서는 감소하지만 유각기에서는 속력과 관계없이 거의 일정한 것을 볼 수 있다 <그림 1 및

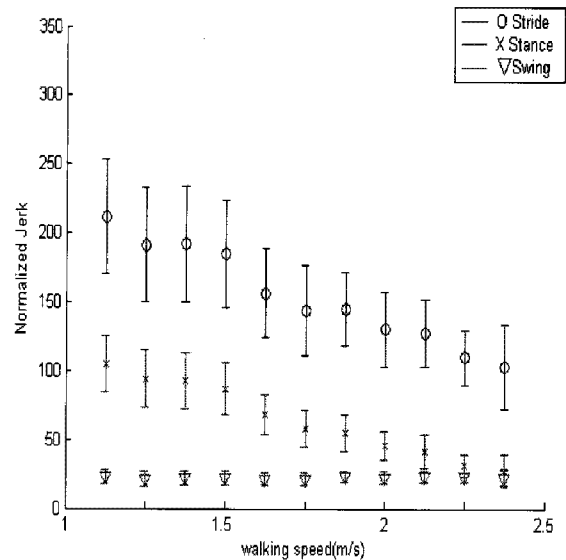


그림 1. 뒤꿈치 마커에서의 수직방향의 정규저크와 보행속력의 상관관계

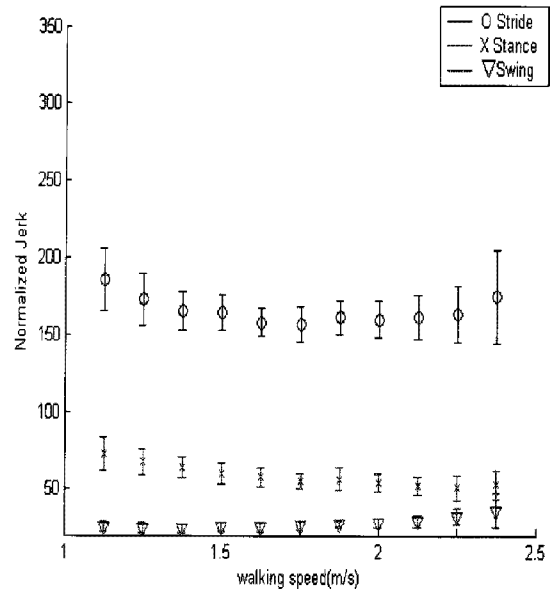


그림 2. 무게중심 마커에서의 수직방향의 정규저크와 보행속력의 상관관계

표 1>. 뒤꿈치마커에서의 수직방향의 정규저크와 보행속력의 상관관계에 대해 회귀분석결과, 유의미한 결과를 보임으로써 속도와 저크와의 관계가 감소하는 형태는 통계적으로 유의미한 결과임을 알 수 있다.

전체보행기에서 인체의 무게중심에서의 수직방향의 정규저크는 속력이 증가함에 따라 처음에는 감소하다가 다시 증가하는 양상을 보이는 즉 2차식의 형태를 띠고 있음을 알 수 있었고, 입각기에서는 조금 감소하는

경향을, 유각기에서는 거의 변화가 없는 현상을 보여주었다 <그림 2 및 표 2>. 무게중심 마커에서의 수직방향의 정규저크와 보행속력의 상관관계에 대해 회귀분석 결과, 유의미한 결과를 보임으로써 속력과 저크와의 관계가 포물선의 형태를 보이는 것은 통계적으로 유의미한 결과임을 알 수 있다.

수직방향을 제외한 전후 및 내외 방향에서의 정규저크는 조금의 변화는 존재했지만, 통계적인 유의성을 발견할 수 없었다. Hreljac(1993)은 최적의 보행속력(피험자가 선호하는 보행속력)에서 보폭 증가와 감소에 의한 영향을 저크비용함수를 이용하여 분석하였다. 보폭이 감소하면 저크비용함수는 감소한다고 보고하였다. Hreljac(1993)의 연구는 동일한 보행속력에서의 결과로 본 연구와는 직접적인 비교가 불가능하지만, 본 연구의 결과는 뒤꿈치에서의 정규저크는 속력이 증가 할수록 감소하는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 보행속력의 증가는 보폭을 증가시키는 경우와 보행빈도를 증가시키는 경우로 나누어 생각할 수 있는데 본 연구에서는 트레드밀의 보행속력에 따라 보행자가 건도록, 즉 보행

빈도나 보폭증가에 어떠한 제한점도 두지 않았다. 정규저크가 작다는 것은 부드러움이 증가한다는 것, 즉 동작이 자연스럽다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 이를 운동제어 및 계획(motor control & planning) 측면에서 살펴보면 피드백제어시스템(feedback control system)인 인체가 보행속력이 빨라짐에 따라 오픈 루프(open loop)로 되는 현상으로 설명할 수가 있다 (Hreljac et al. 1993). 즉 오픈 루프가 되어 이미 계획된 방향으로(planned path) 매우 근접하게 잘 따라갈 수 있기 때문에 보행 속력이 증가함에 따라 뒤꿈치에서의 정규저크가 감소하는 것을 설명할 수 있다.

보행에는 두 가지 매우 중요한 속력이 있다. 즉 신진 대사 에너지가 최소가 되는 속력과 보행에서 주행으로 변하는 전이 속력이다. 앞선 연구(Carrier, 1984; Cavagna et al., 1976; Hreljac et al., 1993; Minetti, 1998; Saibene, 2003)에서 각각의 속력은 약 1.25m/s~1.4m/s, 2.0~2.3m/s 정도임을 찾아냈다. 본 실험에서는 약 1.78m/s의 속력에서 전체보행기의 정규저크가 최소가 되는 2차 곡선의 결과를 보였다. 이 속력은 에너지가 최

표 1. 뒤꿈치 마커에서의 수직방향의 정규저크와 보행속력의 상관관계 (평균 ± 표준편차)

speed (m/s)	1.11	1.19	1.25	1.33	1.56	1.78	1.9	2.0	2.11	2.33	2.47	
Heel	stride	211.8 (±41.1)	191.2 (±41.2)	191.8 (±41.6)	185.2 (±38.9)	156.5 (±32.4)	143.7 (±32.5)	141.5 (±26.2)	129.3 (±27.4)	127.1 (±24.5)	109.6 (±19.7)	103.2 (±30.6)
	stance	104.9 (±20.8)	93.9 (±20.9)	92.7 (±20.8)	86.9 (±18.5)	68.1 (±14.7)	57.8 (±13.7)	53.9 (±14.0)	45.3 (±10.2)	41.3 (±12.4)	31.3 (±7.8)	27.2 (±11.8)
	swing	22.9 (±5.2)	21.4 (±5.3)	22.0 (±4.8)	22.3 (±5.0)	21.1 (±4.5)	21.3 (±4.8)	22.6 (±3.7)	22.3 (±4.9)	23.0 (±4.2)	22.6 (±3.9)	22.4 (±5.9)

표 2. 무게중심 마커에서의 수직방향의 정규저크와 보행속력의 상관관계 (평균 ± 표준편차)

speed (m/s)	1.11	1.19	1.25	1.33	1.56	1.78	1.9	2.0	2.11	2.33	2.47	
COM	stride	185.3 (±20.5)	172.6 (±17.1)	165.6 (±12.5)	164.1 (±11.8)	158.0 (±9.1)	156.7 (±11.3)	159.6 (±10.6)	159.3 (±12.3)	161.3 (±14.4)	163.0 (±18.4)	174.6 (±30.2)
	stance	72.7 (±10.7)	67.3 (±8.4)	63.8 (±6.4)	60.5 (±6.7)	57.8 (±6.3)	55.2 (±4.7)	55.7 (±6.9)	53.7 (±5.4)	52.2 (±5.6)	51.1 (±8.3)	52.8 (±9.5)
	swing	25.5 (±3.4)	24.5 (±3.3)	24.0 (±2.9)	25.1 (±2.9)	25.0 (±2.9)	26.1 (±3.0)	27.2 (±2.4)	28.2 (±3.0)	29.5 (±3.7)	32.5 (±5.4)	36.3 (±11.0)

소가 되는 속도도 아니며, 전이속력도 아니었다. 이 속력이 가지는 의미를 설명한다는 것은 현재로는 매우 어려운 문제라고 생각된다. 본 실험에서 계산된 약 1.78m/s라는 속력은 트레드밀보행에서 피험자들이 일반적으로 선호하는 보행속력(preferred walking speed)과 거의 일치함을 보였다. 여기에서 선호하는 보행속력은 피험자가 실험 중에 임의의 11개의 속력 중에 가장 편안하다고 느끼는 속력이라고 설문조사한 결과이다. 즉 이 결과는 선호하는 속력에서 인체의 무게중심의 움직임이 다른 속력에서 보다 더 부드럽다(smooth)는 것을 의미한다고 할 수 있다. 또한 이 속력은 Hreljac 등(1993)이 보고한 선호 보행속력인 1.75m/s와 매우 유사한 값으로 무게중심에서의 정규저크가 최소로 되는 보행속력은 일반적으로 선호 보행속력과 매우 밀접하다고 할 수 있다.

본 연구에서 에너지가 최소가 되는 속력과 동작의 부드러움이 최소가 되는 속력이 서로 일치할 것이라고 예상했지만 에너지가 최소가 되는 속력은 피험자가 보행 시 편안하게 느끼는 속력과는 다르다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 보다 더 세밀한 분석이 필요할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

동작의 부드러움을 나타내는 정량적인 지표인 정규저크를 이용하여 보행속력의 변화에 따른 변화를 관찰하였다. 일반적으로 알려진 동작의 끝점인 발꿈치에서의 정규저크는 보행속력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였지만, 인체 무게중심에서의 정규저크의 변화는 보행속력에 따라 2차식의 형태를 띠는 결과를 보였다. 또한 본 실험에서 피험자가 선호하는 속력에서 동작의 부드러움이 최대가 되는 것을 알게 되었다. 약 1.78m/s의 속력에서 동작이 최대한 부드럽게 이루어진다는 것이다. 에너지가 최소가 되는 속력과 동작의 부드러움이 최대가 되는 속력은 같지 않음을 알 수 있었다.

향후 연구에서는 부드러움에 관해서 보행뿐만 아니라 주행에 관한 연구와 보행에서 주행으로, 주행에서 보행으로 바뀌는 전이속력에 관한 연구를 통하여 에너

지측면의 최적보행속력(energetically optimal walking speed), 선호보행속력(preferred walking speed), 선호주·보행전이속력(preferred walk-run or run-walk transition speed)과 부드러움과의 상관관계에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- Carrier, D. (1984). The energetic paradox of human running and hominid evolution. *Current Anthropology*; 25, 483-495.
- Cavagna, G. & Thys, H. & Kaneko, M. (1976). Mechanical work and efficiency in level walking and running. *Journal of Physiology*; 262, 639-657.
- Corcoran, P. & Brengelmann, G. (1970). Oxygen uptake in normal and handicapped subjects, in relation to speed of walking beside velocity-controlled cart. *Arch Phys Med Rehabil*; 51, 78-87.
- Giakas, G. & Baltzopoulos, V. (1997). Optimal digital filtering requires a different cut-off frequency strategy for the determination of the higher derivatives. *Journal of Biomechanics*; 30, 851-855.
- Hreljac, A. (1993). The relationship between smoothness and performance during the practice of a lower limb obstacle avoidance task, *Biological Cybernetics*; 68, 375-379.
- Hreljac, A. & Martin, P. E. (1993). The relationship between smoothness and economy during walking. *Biological Cybernetics*; 69, 213-218.
- Hreljac, A. & Marshall, R. N. (2000). Algorithms to determine event timing during normal walking using kinematic data. *Journal of Biomechanics*; 33, 783-786.
- Hreljac, A. (2000). Stride smoothness evaluation of

- runners and other athletes. *Gait & Posture*; 11, 199-206.
- Minetti, A. (1998). A model equation for the prediction of mechanical internal work of terrestrial locomotion. *Journal of Biomechanics*; 31, 463-468.
- Rose, J. & Gamble, J. & Burgos, A. & Medeiros, J. & Haskell, W. (1990). Energy expenditure index of activity for normal children and for children with cerebral palsy; *Dev. Med. Child Neurol*; 32, 333-340.
- Saibene, F. & Minetti, A. (2003). Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans. *Eur. J. Appl. Physiol*; 88, 297-316.
- Viviani, P. & Flash, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology*; 21, 32-53.
- Wells, R. P. & Winter, D. A. (1980). Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. *Proceedings of the special conference of the Canadian Society for Biomechanics (CSB); Human Locomotion I*, 92-93.
- Zarrugh, M. & Todd, F. & Ralston, H. (1974). Optimization of energy expenditure during level walking. *Eur. J. Appl. Physiol*; 33, 293-306.

투 고 일 : 1월 30일

심 사 일 : 2월 2일

심사완료일 : 2월 25일