

트레드밀 보행 시 단일 3축 가속도센서를 사용한 대사에너지 소모량 예측

이희영^{1,2} · 박선우^{1,2} · 김승현^{1,2} · 이동엽^{1,2} · 김영호^{1,2}

¹연세대학교 대학원 의공학과

²연세의료공학연구원

Prediction of energy expenditure from a tri-axial accelerometer during treadmill walking

H. Y. Lee^{1,2}, S. W. Park^{1,2}, S. H. Kim^{1,2}, D. Y. Lee^{1,2} and Y. H. Kim^{1,2}

¹Dept. of Biomed. Eng., Graduate School, Yonsei Univ.

²Institute of Medical Eng., Yonsei Univ.

(Received October 11, 2010. Accepted March 15, 2011)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the relevance of the prediction equations derived from the relationship between metabolic energy expenditure and kinetic energy, for different speeds of walking and running over the treadmill. Seven male subjects participated in this study. A tri-axial accelerometer was attached on between the left and right posterior superior iliac spines. Kinetic energy was calculated by the integration of acceleration data and compared with the metabolic energy measured by a gas analyzer. Correlation coefficients were determined to find a relationship between the kinetic energy and the metabolic energy expenditure. Also, the difference between measured and predicted values was used to find the relevance for individual and group equations. Results showed a relatively good correlation between the measured metabolic energy and the calculated kinetic energy. In addition, a dramatic increase in kinetic energy was observed at the transition speed of walking and running (6 km/h). There was no difference in how to predict the kinetic energy expenditure for individual and group even though people have different physical characteristics. This study would be useful to predict metabolic energy expenditures by the regression analysis with acceleration data.

Key words: Energy Expenditure, Walking, Running, Metabolic, Kinetic

1. 서 론

최근 국민건강보험공단의 발표에 따르면 우리나라 10대 이상 남녀의 30.5%가 체질량지수(body mass index, BMI)가 25.0이상인 비만으로 나타났으며[1], 비만은 당뇨, 고혈압, 고

지혈증 등의 대사관련 질병의 발병 가능성을 높이는 가장 큰 원인으로 밝혀지고 있다[2]. 잘못된 생활양식과 신체활동의 부족에 따른 비만이 대사관련 질병 등에 중요한 영향을 미친다는 것이 알려짐에 따라 규칙적인 신체활동을 권장하고, 또한 신체활동이 중요한 요소로 인식되며 이에 관한 연구가 다양한 측면에서 수행되고 있다.

Corresponding Author : 김영호
강원도 원주시 흥업면 매지리 234 연세대학교 첨단 의료기기 테크노타워 204호 (220-710)
TEL: +82-33-760-2859 / FAX: +82-33-760-2806
E-mail. younghokim@yonsei.ac.kr

본 연구는 중소기업청(SMBA)의 산학협력 기업부설연구소 설치 지원사업과 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

과학기술이 발달하면서 신체활동과 에너지 소모량을 용이하게 측정할 수 있는 도구가 개발되었다. 일반적으로 에너지 소모량을 측정하는 방법으로 호흡가스 분석기를 활용하여 심폐능력을 정밀하게 측정한 후 최대운동능력을 고려하여 트레드밀(treadmill)을 활용한 운동이 이루어지는데[3], 호흡가스 분석기는 고가이고 에너지 소모량을 측정할 때 마스크를 착용

용해야 하므로 휴대하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 크기가 작고 휴대 가능한 도구를 개발하기 위해 다양한 센서를 인간의 몸에 고정시켜 움직임을 감지하여 에너지 소모량을 측정하는 기술이 제안되고 있다[4]. 그 중 가속도 센서는 센서의 출력 값과 에너지 소모량 사이에 밀접한 관계가 증명된 것에 기반하여, 운동량을 측정하기 위한 가장 적합한 센서로 알려져 있으며, 수 십 년 동안 움직임을 연구하는데 사용되어 왔다.

Crouter 등[5]은 가속도 센서 데이터로부터 에너지 소모량을 추정하는 새로운 회귀 방정식을 기존에 제시되었던 다른 식과 비교하는 연구를 하였고, Nilsson 등[6]은 가속도 성분의 피크 수를 측정하여 기존의 에너지 소모량을 추정하는 식들로부터 예측하는 에너지 소모량의 차이점을 비교 분석하였다. Chen과 Sun[7]은 열량계(calorimeter)를 이용하여 측정한 에너지 소모량과 하나의 가속도 센서를 이용하여 선형 방정식과 비선형 방정식을 통한 에너지 소모량을 비교하는 연구를 하였고, 강동원 등[8]은 가속도 센서의 부착위치에 따른 회귀식을 통하여 에너지 소모량의 예측 정확도에 관한 연구 결과를 보고하였다.

선행연구에서는 여러 가속도 센서를 이용하여 에너지 소모량을 추정하였으나, 이는 실용성보다는 정확성에 초점이 맞추어져 다양한 응용이 제한적이다. 특히, 가속도 센서의 위치가 멀리 떨어져 있는 경우 유선 처리 문제를 피할 수 없으므로 일상생활에서의 응용에는 적절하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 간편한 에너지 모니터링 시스템 개발에 앞선 한 개의 3축 가속도 센서를 사용하여 보행 시 대사에너지 소모량을 예측하고자 하였다. 이를 위해 트레드밀 위에서 걷기와 뛰기 시 획득된 가속도 신호와 대사에너지 소모량 사이의 선형회귀분석을 수행하였고, 회귀방정식을 이용하여 예측된 대사에너지 소모량과 실험 시 획득한 대사에너지 소모량의 차이를 이용한 개인별 추정식과 집단별 추정식 방법에 대해 Bland-Altman 도표 분석을 이용하여 판단하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험 대상

외부 환경에 간섭을 받지 않도록 동작분석 실험실에서 실험을 시작하기 전에, 호흡가스 분석기의 사용 준비 과정에서 압력, 부피, 가스를 보정한 후 실험을 진행하였다. 또한 비정상적인 보행이나 나이차에 따른 에너지 소모량의 변화를 최소화하기 위해 질병이나 상해가 없고 정상적 보행을 하는 건강한 20대 남성 7명의 피검자를 선정하였다. 피검자들의 평균 나이, 체중, 신장, BMI는 각각 25.4세(± 0.8), 70.6kg(± 10.7), 170.9cm(± 5.6), 24.0(± 3.4)이다(표 1).

표 1. 피검자 선정

Table 1. Subject parameters (n=7)

Subject	Age(years)	Weight(kg)	Height(cm)	BMI
A	25	60	173	20.1
B	25	73	176	23.9
C	25	75	173	23.6
D	25	82	177	26.3
E	26	53.6	162	20.4
F	25	68.9	170	23.8
G	27	82	165	30.1
Mean	25.4	70.6	170.9	24.0
SD	0.8	10.7	5.6	3.4

2.2 실험 장비

호흡가스 분석기(Metamax, Cortex Biophysik GmbH Co., Germany)로 대사에너지 소모량을 측정하였고, 가속도 성분을 측정하기 위해서 3축 가속도 센서(CXL02LF3, Crossbow Technologies, Canada)를 양측 후상장골극(posterior superior iliac spine, PSIS)의 중간 지점에 부착하였으며, 트레드밀(Gaitway, HP Cosmos, Germany) 위에서 피검자의 보행을 유도하였다. 3축 가속도 센서는 ± 25 g의 측정범위를 가지는 것을 사용하였고, 데이터는 LabVIEW (National Instruments Inc., USA) 프로그램을 이용해서 50Hz의 샘플링율(sampling rate)로 저장되었다(그림 1).

2.3 실험 방법

실험 실시 30분 전부터 피검자들에게 최대한 안정을 유지하도록 하고 실험 진행에 대한 설명을 하였다. 이후, 실험 장비를 착용한 후 피검자에게 트레드밀 위에서 3 km/h, 4 km/h

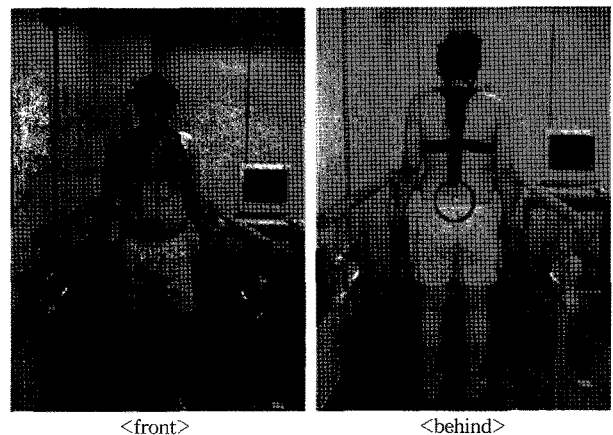


그림 1. 실험 장비 착용 모습

Fig. 1. Picture of subject, who is wearing equipment

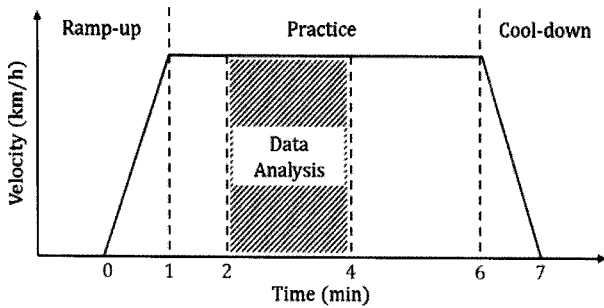


그림 2. 실험 절차
Fig. 2. Procedure of experiment

h, 5 km/h, 6 km/h에서 걷고, 7 km/h, 8 km/h, 9 km/h에서 뛰도록 지시하였다. 걷기(또는 뛰기)의 속도는 운동의 누적효과를 줄이기 위해서 임의의 순서대로 선정하였고, 1분 동안의 ramp-up, 5분 동안의 걷기(또는 뛰기), 1분 동안의 cool-down으로 총 7분의 시간으로 구성된 운동 프로토콜을 작성하여 적용하였다(그림 2). 매 실험 트라이얼마다 실험 시작 전 1분 동안 정적 상태에서 가속도 신호를 오프셋 값으로 측정하여 드리프트 보정 및 적분상수 계산하는데 사용되었다. 동일한 방법을 적용하여 각기 다른 날짜에 3회 수행하였다. 매 실험 트라이얼이 끝나면 충분한 휴식을 취하였고, 심박수가 안정되었음을 확인한 후에 다른 속도의 실험을 실시하였다[8].

2.4 분석 방법

매 실험 트라이얼의 소요 시간인 7분 동안, 호흡가스 분석기와 가속도 센서에서 동시에 신호를 받았고, 그 중 운동시작 후 불안정한 에너지 소모도 수치에 따른 오차가 적고 VO₂, VCO₂가 정상상태(steady-state)인 구간 2분을 데이터 분석에 이용하였다[9]. 호흡가스 분석기에서 10초마다 하나씩 출력되는 일일 에너지 소모량(kcal/day) 값을 운동에너지

지와의 비교를 위해 kcal로 변환하였다. 가속도 센서에서 50Hz의 샘플링율로 출력되는 3축의 가속도 값을 3축의 합인 벡터크기(signal vector magnitude, SVM)를 이용하여 하나의 값으로 나타냈다. 이 값을 Simpson's rule을 이용하여 시간에 따른 속도 성분으로 적분하였고[11], 실험 시작 전 정적 상태에서 측정하였던 오프셋 값을 사용하여 드리프트 보정 및 적분상수를 고려하였다. 시간에 따른 속도 성분은 피검자의 몸무게를 고려한 운동방정식에 대입하여 시간에 따른 운동에너지(J)로 계산되었다. 분석 구간으로 사용한 2분 동안의 시간에 따른 에너지 소모량을 모두 더하여 3~9 km/h에 대한 값으로 각각 나타내었다(그림 3). 이를 이용하여 피검자의 특성을 고려한 개인별 회귀방정식과 고려하지 않은 집단별 회귀방정식을 도출하고, 두 에너지 소모량 간의 상관관계를 분석하였다. 회귀방정식을 이용하여 예측된 대사에너지 소모량과 실험 시 획득한 대사에너지 소모량의 차이를 이용한 개인별 추정식과 집단별 추정식 방법에 대해 Bland-Altman 도표 분석을 이용하여 판단하고자 하였다[12].

3. 결 과

3.1 속도별 운동에너지와 대사에너지 소모량의 분포

그림 4-(a)는 보행 속도에 따른 운동에너지와 대사에너지의 소모량을 나타내고 있다. 운동에너지를 보면, 걷기에서는 3 km/h에서 0.29 ± 0.18kcal, 4 km/h에서 0.42 ± 0.17kcal, 5 km/h에서 0.64 ± 0.22kcal, 6 km/h에서 1.16 ± 0.56kcal로 계산되었고, 뛰기에서는 7 km/h에서 4.65 ± 1.18kcal, 8 km/h에서 5.52 ± 1.58kcal, 9 km/h에서 6.26 ± 1.27kcal로 계산되었다. 이에 호흡가스 분석기에서 측정된 대사에너지 소모량을 보면, 걷기에서는 3 km/h에서 7.46 ± 1.36kcal, 4 km/h에서 8.27 ± 1.70kcal, 5 km/h에서 9.96 ± 1.85kcal, 6 km/h에서 12.64 ± 2.97kcal로 측정되었고, 뛰기에서는

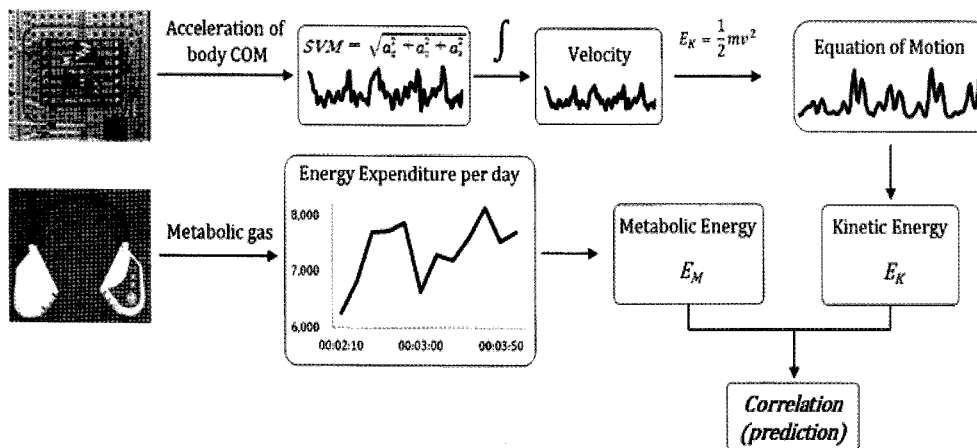


그림 3. 에너지 소모량 추정을 위한 연구 흐름도
Fig. 3. Process to predict the energy expenditure

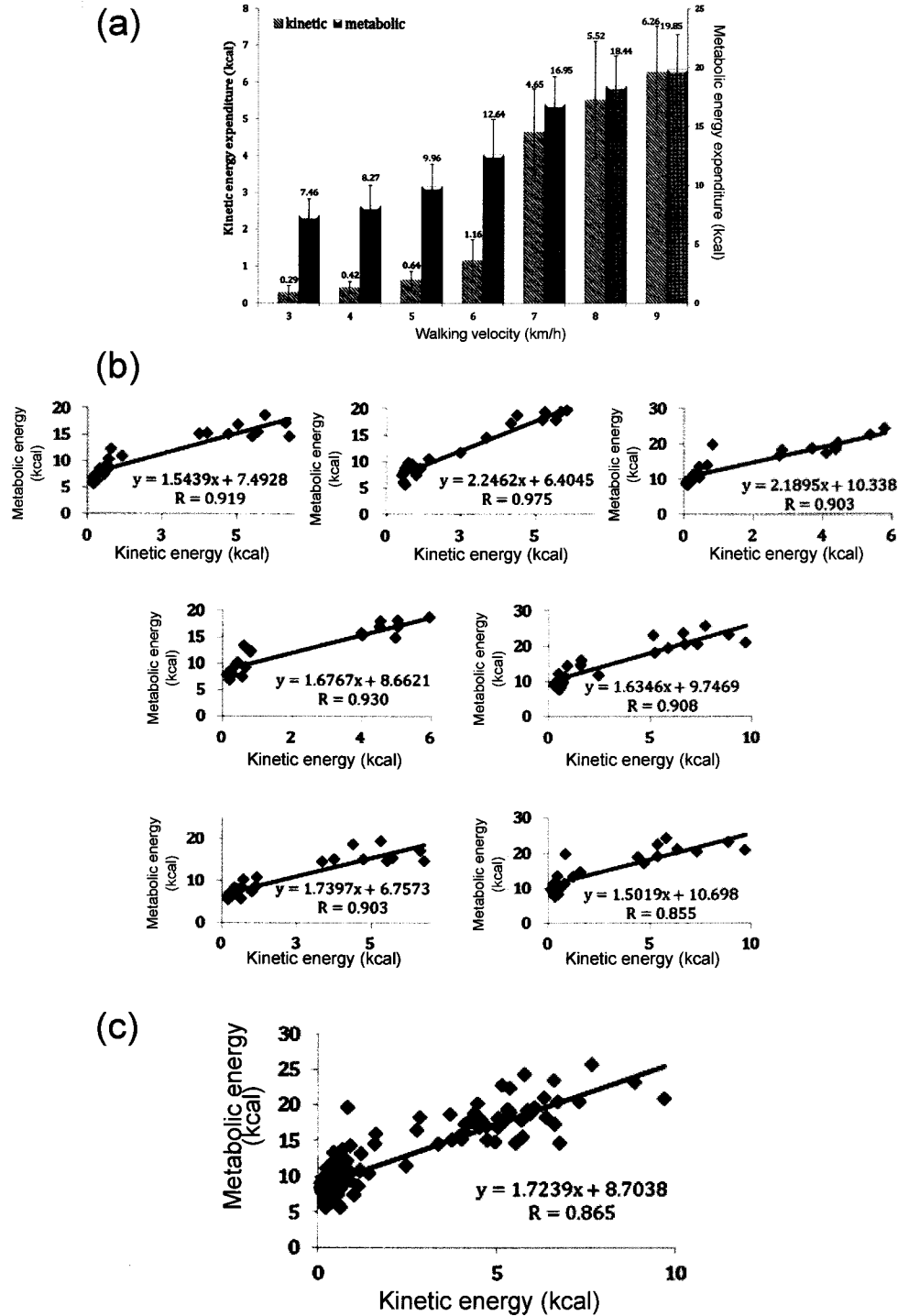


그림 4. 동작별, 개인별, 집단별 에너지 소모량에 대한 분석

Fig. 4. Comparison of energy expenditure in various speed with walking and running(a), and correlation between the kinetic energy and metabolic energy with computed from the individual's equations(b) and one equation included whole data(c)

7 km/h에서 16.95 ± 2.26 kcal, 8 km/h에서 18.44 ± 2.52 kcal, 9 km/h에서 19.85 ± 2.95 kcal로 측정되었다. 또한, 운동에너지와 대사에너지 소모량의 동작에 따른 상관계수는, 걷기에서 0.842부터 0.993까지 나타났고 뛰기에서 0.818부터 0.995까지 보였다.

3.2 개인별 및 집단별 운동에너지와 대사에너지 소모량의 상관관계 분석

그림 4-(b)는 7명의 피검자 개인별 속도에 따른 운동에너지와 대사에너지 소모량의 상관관계를 나타내고 있다. 피검자 A(좌상)부터 피검자 G(우하)의 그래프에서 두 에너지 소

표 2. 운동에너지에 대한 개인별 및 집단별 대사에너지 소모량 추정식의 차이 값

Table 2. Difference from prediction equation about kinetic energy expenditure for individual and group

Subject	Range(kcal)			
	Difference with kinetic energy expenditure		Average (Individual + Group)/2	Difference (Individual - Group)
	Individual	Group		
A	0.01-1.94	0.62-3.91	0.50-2.71	-2.40 -1.05
B	0.01-1.20	0.09-2.85	0.11-2.02	-1.65 -0.16
C	0.55-3.92	0.44-6.20	1.03-5.06	-3.89 -0.07
D	0.02-2.22	0.17-2.48	0.10-2.35	-0.29 -0.32
E	0.44-1.85	0.13-2.11	0.29-1.46	-1.30 -1.37
F	0.37-2.03	0.68-3.53	0.80-2.60	-1.86 -1.61
G	0.22-3.15	0.25-3.33	0.41-2.32	-0.46 -2.30

***Boldface** indicates negative values.

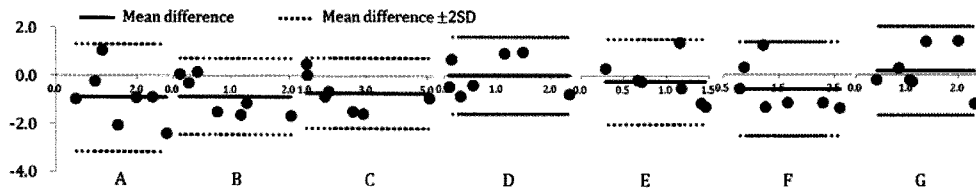


그림 5. 개인별, 집단별 에너지 소모량 추정식에 대한 Bland-Altman 도표

Fig. 5. Bland-Altman plots to show the differences(kcal) between measured metabolic energy expenditure and predicted metabolic energy expenditure from calculated the kinetic energy expenditure

모양 사이의 배수 및 상관계수를 보면, A는 1.544배와 0.919, B는 2.246배와 0.975, C는 2.190배와 0.903, D는 1.677배와 0.930, E는 1.635배와 0.908, F는 1.740배와 0.903, G는 1.502배와 0.855를 보였다.

그림 4-(c)는 피검자의 구분 없이 속도에 따른 운동에너지와 대사에너지 소모량의 상관관계를 나타내고 있다. 두 에너지 소모량 사이의 배수 및 상관계수를 보면 1.724배와 0.865를 보였다.

3.3 개인별 및 집단별 에너지 소모량 추정식의 오차율 분석

앞에서 언급한 바와 같이 그림 4-(b)와 그림 4-(c)는 가속도 센서로부터 계산된 운동에너지를 이용하여 대사에너지 소모량을 추정하는 회귀식을 나타내고 있다. 이 때, 호흡가스 분석기에서 측정된 대사에너지 소모량 값과 운동에너지로부터 추정된 회귀식에 대입하여 나온 대사에너지 소모량 값을 비교하여, 운동에너지에 대한 개인별 및 집단별 대사에너지 소모량 추정식의 차이 값을 나타내었다(표 2). 또한, 개인별 에너지 소모량 추정식과 집단별 에너지 소모량 추정식에 대하여 Bland-Altman 도표 분석한 결과, 차이의 2 표준편차 (mean difference \pm 2SD)가 각각 2.24%, 1.58%, 3.65%,

0.53%, 1.77%, 2.60%, 3.07%를 보였다(그림 5).

4. 고찰 및 결론

기존의 선행연구에서는 가속도 센서를 단순한 카운터(영점 통과 수, peak 수 측정용)로만 사용하였고 벡터 합 성분을 이용한 연구도 벡터크기 합 성분 계산에 그치는 경우가 대부분이었다. 그러나 본 연구에서는 벡터크기 합 성분을 계산한 후 이 값으로 시간에 대해 적분을 하고 피검자의 몸무게를 고려해주어 운동에너지 값을 직접 계산하는 방식을 시도하였고 호흡가스 분석기에서 나오는 대사에너지 소모량과 비교 분석을 하였다. 가속도 성분의 원 데이터를 고역필터와 저역필터에 차례로 통과시키고, SVM을 이용한 시간에 따른 가속도 성분을 Simpson's rule을 이용하여 적분을 해서 시간에 따른 속도 성분으로 얻었다. 이에 피검자의 몸무게를 고려한 운동방정식에 대입하여 운동에너지를 얻었다. 동기화한 운동에너지와 대사에너지 소모량의 걷기와 뛰기에 따른 상관관계도 0.818에서 0.995까지 분포하였다.

이와 관련하여 운동에너지와 대사에너지 소모량의 상관관계를 통해 개인별 및 집단별 에너지 소모량 추정식이 얻어졌

고 이를 선형 회귀식으로 표현하였는데, Chen과 Sun[7]의 연구에서는 측정된 에너지 소모량과 계산된 에너지 소모량을 선형 회귀식과 비선형 회귀식으로 나타내어 비교하였다. 본 논문의 결과 값을 보면 걷기와 뛰기에서의 에너지 소모량 분포가 서로 경향이 다른 것을 확인하였는데, 이는 선행연구에서 밝힌 선형 회귀식보다 비선형 회귀식의 정확도가 더 높다고 설명한 부분과 일치하며 선형 회귀식 뿐만 아니라 비선형 회귀식으로 접근할 필요성이 있다고 생각한다. 또한, 계산된 운동에너지로부터 만들어진 두 가지 에너지 소모량 추정식에 대해 Bland-Altman 도표 분석을 한 결과, 모든 데이터 값이 각각 차이의 2 표준편차(mean difference \pm 2SD)인 2.24%, 1.58%, 3.65%, 0.53%, 1.77%, 2.60%, 3.07%안에 분포하여 이들 간의 차이는 없다는 것을 확인하였다. 이는 에너지 소모량을 추정하는 회귀식에 있어, 개인별이나 집단별로 구분할 필요성이 적다는 것을 의미한다고 생각한다.

비록 운동에너지와 대사에너지 소모량의 비율이 같을 수는 없으나 몸이 움직인다는 것은 근육들의 대사에너지 소모를 통해 COM의 위치가 변한다고 생각되고 이를 가속도 신호로부터 계산되는 값으로 추측할 수 있다고 사료된다. 본 연구의 실험 결과를 통해 계산된 운동에너지와 측정된 대사에너지 소모량의 값의 차이가 비슷한 것을 알 수 있었고, 이를 근거로 추가실험을 진행하여 에너지 소모량을 보다 정확하게 예측할 수 있다면, 향후 단일 3축 가속도 센서를 이용하여 간편하게 운동에너지 측정을 함으로써 운동 관리를 용이하게 지원해주는 시스템에 적용한다면, 가볍고 값이 싸며 사용이 간편한 모니터링 시스템이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 국민보험관리공단(2008), 비만도 조사
- [2] Anderssen, S. A. & Hjermann, I., "Physical activity - a crucial factor in the prevention of cardiovascular diseases," *Tidsskr Nor Laegeforen*, vol. 120, no. 26, pp. 3168-3172, 2000.
- [3] American College of Sports Medicine, "ACSM's Resources for the Personal Trainer," pp. 404-430, 2007
- [4] Y. M. Song, H. J. Ku, M. C. Lee, S. B. Lee, "Methods of Estimation of Physical Activity and Energy Expenditure," *International Journal of Coaching Science*, vol. 7, no. 3, pp. 159-168, 2005.
- [5] Scott E. Crouter, Kurt G. Clowers, David R. Bassett, "A novel method for using accelerometer data to predict energy expenditure," *J Appl. Physiol.* 100: pp. 1324-1331, 2006.
- [6] A. Nilsson, S. Brage, S. A. Anderssen, L. B. Sardinha, N. Wedderkopp, L. B. Andersen, U. Ekelund, "Comparison of equations for predicting energy expenditure from accelerometer counts in children," *Scand J Med. Sci. Sports*, 18: pp. 643-650, 2008
- [7] K. Y. Chen, M. Sun, "Improving energy expenditure estimation by using a triaxial accelerometer," *J. Appl. Physiol* 83: pp. 2112-2122, 1997.
- [8] D. W. Kang, J. S. Choi, K. R. Mun, Y. H. Bang, G. R. Tack, "A study on the estimation accuracy of energy expenditure by different attaching position of accelerometer," *Korean Journal of Sport Biomechanics.*, vol. 19, no. 1, pp. 179-186, 2009.
- [9] Marco Trallesi, Paolo Porcaccia, Tiziano Averna, Stefano Brunelli, "Energy cost of walking measurements in subjects with lower limb amputations : A comparison study between floor and treadmill test," *Gait & Posture*, vol. 26, pp. 70-75, 2008.
- [10] J. H. Choi, J. Lee, H. T. Hwang, J. P. Kim, J. C. Park, K. Shin, "Estimation of activity energy expenditure : accelerometer approach," *Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, Shanghai, China, September 2005.*
- [11] Y. J. Jang, M. W. Jung, J. M. Kang, H. C. Kim, "An wearable energy expenditure analysis system based on the 15-channel whole-body segment acceleration measurement," *Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, Shanghai, China, September 2005.*
- [12] B. I. Lee, D. S. Lee, J. S. Lee, W. J. Kang, J. K. Chung, M. C. Lee, H. K. Choi, "Development of evaluation method of regional contractility of left ventricle using gated myocardial SPECT and assessment of reproducibility," *The Korean Society of Nuclear Medicine*, vol. 37, pp. 73-80, 2003.