



3축 가속도계와 신체정보를 이용한 보행 및 주행시 에너지 소비량의 예측

Estimation of Energy Expenditure of Walking and Running Based on Triaxial Accelerometer and Physical Information

강동원 · 최진승 · 문경률 · 탁계래* (건국대학교, 의공학실용기술연구소)
Kang, Dong-Won · Choi, Jin-Seung · Mun, Kyung-Ryoul · Tack, Gye-Rae*
(Kon-Kuk University, Research Institute of Biomedical Engineering)

국문요약

본 연구의 목적은 신체활동 시에 간단하고 실용적인 방법으로 에너지 소비를 예측하는데 있다. 신체활동은 허리에 부착된 3축 가속도계 센서를 사용하여 가속도의 합으로써 정량화하였다. 에너지 소비량과 가속도계 데이터의 관계를 찾기 위하여 11명(남성 6명, 여성 5명)의 피험자를 상대로 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 6.5, 7.0, 8.5km/hr의 속도로 트레드밀에서 걷거나 달리는 동작을 시행하였다. 각 피험자는 트레드밀 속도가 6.0km/hr 일 경우에는 걷는 동작을 6.5km/hr 이상일 경우에는 달리는 동작을 수행하였다. 실제 에너지 소비량은 가스분석기를 통하여 측정되었다. 예측 식은 피험자의 성, BMI(Body Mass Index), 가속도 데이터로 이루어졌으며 걷기, 달리기로 총 2개의 다중회귀식으로 구현되었다. 실제 측정된 에너지 소비량과 예측된 에너지 소비량 간의 상관계수와 결정계수는 걷기와 달리기에서 각각 $R=0.936$, $R^2=0.876$ 와 $R=0.881$, $R^2=0.776$ 를 나타내었다. 추후의 연구에서는 보다 많은 피험자의 데이터를 이용하여 보다 신뢰성 있는 에너지 소비량 예측의 회귀식을 구현하고자 한다.

ABSTRACT

D. W. KANG, J. S. CHOI, K. R. MUN and G. R. TACK, Estimation of Energy Expenditure of Walking and Running Based on Triaxial Accelerometer and Physical Information, Vol. 18, No. 4, pp. 109-114, 2008. The purpose of this study was to estimate the energy expenditure simply and practically during physical activities. The physical activity is quantified by the integration of the accelerometer signals obtained from the triaxial accelerometer attached at the waist level of the human body. To find a relationship between energy expenditure and accelerometer data, 6 male and 5 female subjects walked and ran on the treadmill with speeds of 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 6.5, 7.0, and 8.5 km/hr. Each subject performed walking at the speed lower than 6.0 km/hr and running at the speed higher than 6.5 km/hr. Actual energy expenditure was determined by a continuous direct gas analyzer. Two predictive equations of walking and running mode for energy expenditure which includes gender, body mass index(BMI) and data from accelerometer were developed using multiple regression analysis. The correlation coefficients and coefficients of determination between the estimated and measured energy expenditure were $R=0.936$, $R^2=0.876$ and $R=0.881$, $R^2=0.776$ in walking and running mode, respectively. For further study, experiments on a larger scale of test subjects are essential for acquiring more reliable results.

KEYWORDS : MULTI REGRESSION ANALYSIS, ENERGY EXPENDITURE, ACCELEROMETER, ESTIMATION

I. 서론

한국보건사회연구원의 자료에 따르면 우리나라 15세 이상 남자의 20.3%, 여자의 11.4%가 비만이라고 한다. 현대인의 운동 부족으로 인한 비만은 체력저하 뿐만 아니라 각종질환의 원인이 되고 있다. 이러한 운동부족을 예방하고 개선하기 위해서 신체활동은 중요한 요소이며 이것을 측정하는데 있어서 에너지 소비량은 표준 자료로써 사용되고 있다. 에너지 소비량을 간접적으로 측정하기 위한 여러 방법이 있으며 그중에 호흡교환율을 이용한 호흡가스분석기가 신뢰성 있는 측정방법으로 알려져 있다. 하지만 기존의 호흡가스분석기는 착용이 불편하여 실용성이 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 심박수나(박재영, 박성태, 전태원, 엄우섭, 이동기, 박익렬, 강현주, 2004; Davidson et al., 1997; Livingstone et al., 2000; Moon et al., 1996; Motonaga et al., 2006) 관성센서(Chen et al., 1997; Meijer et al., 1991; Meijer et al., 1999; Sallis et al., 1990; Wang et al., 2005; Welk et al., 2007)등을 이용한 측정방법을 사용하고 있다. 그러나 심박수의 경우 스트레스와 같은 심리적인 요인으로 인한 영향을 많이 받으며 낮은 강도의 활동에서 산소섭취량과의 낮은 상관을 나타내었다(Christensen et al., 1983). 이러한 관점에서 움직임만을 감지하는 가속도센서를 사용하여 에너지 소비량 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 1990년대부터 상용화되기 시작하여 현재까지 개발되고 있다. 대표적인 상용화 장비로는 Actigraph, TriTrac-R3D, RT3, BioTrainer-Pro, SenseWear Armband등을 들 수 있으며 이와 같은 장비들은 크기가 작기 때문에 손목이나 허리에 착용함으로써 기존의 호흡가스분석기가 가지는 불편함을 해소할 수 있었다. 하지만 앞서 언급한 장비들을 사용하여 호흡가스분석기의 에너지 소비량과의 상관관계를 살펴본 결과($r=0.14\sim0.85$) 많은 차이를 나타냄을 알 수 있었다(King et al., 2004). 또한 이러한 상업적인 목적으로 개발된 장비들의 에너지 소비량 예측에 대한 회귀식은 공개되지 않으며 서양인들을 대상으로 하여 이루어졌기 때문에 한국인의 체형에는 적합하지 않다.

따라서 본 연구는 쉽게 동작을 감지할 수 있고 측정이 간편하고 적용이 편리하다는 장점을 가지는 소형의 가속도센서를 이용하여 실용성을 높이고 신체활동 시 피험자의 정보와 가속도 데이터를 이용하여 좀 더 정확한 에너지 소비량의 예측 방법에 대하여 분석하고자 하였다. 또한 본 연구의 결과는 여러 가지 다양한 스포츠 동작에 대한 에너지 소비량 예측을 위한 기초 연구로써 활용이 가능할 것으로 판단된다.

II. 연구방법

1. 실험 대상

피험자는 내외과적인 질환이 없는 신체 건강한 20대 성인남성 6명과 성인여성 5명을 대상으로 실험을 실시하였으며 피험자의 신장과 체중을 측정하여 BMI를 계산하였다.

2. 실험 방법

실험은 피험자가 트레드밀에서 총 7가지의 다른 속도(1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 6.5, 7.0, 8.5km/h)로 호흡가스분석기(Metamax 3B, Cortex Biophysik GmbH Co., Germany)와 3축 가속도 센서모듈을 허리에 부착하여 실시하였다. $\pm 6g$ 의 민감도를 가지는 Freescale사의 MMA7260 가속도 센서를 사용하였으며 RF통신을 이용하여 무선으로 데이터를 전송하였다. 전송된 데이터는 LabView(National Instruments Inc., USA)프로그램을 통해 73Hz의 샘플링으로 저장할 수 있도록 구현하였다. 센서의 3축 방향은 전후방향의 X축, 수직방향의 Y축, 내외 방향의 Z축으로 구성된다. 트레드밀 속도가 6.0km/h 이하일 경우 걷는 동작을(평균속도 : 3.75 km/h), 6.5km/h 이

표 1. 피험자 신체적 특성

Gender	Age	Weight(kg)	Height(cm)	BMI
Male(n=6)	24.3 \pm 1.6	69 \pm 11.5	172.8 \pm 6.5	22.9 \pm 2.4
Female(n=5)	23.2 \pm 1.2	53.6 \pm 4.6	161.4 \pm 2.4	20.6 \pm 1.9
Mean \pm SD				

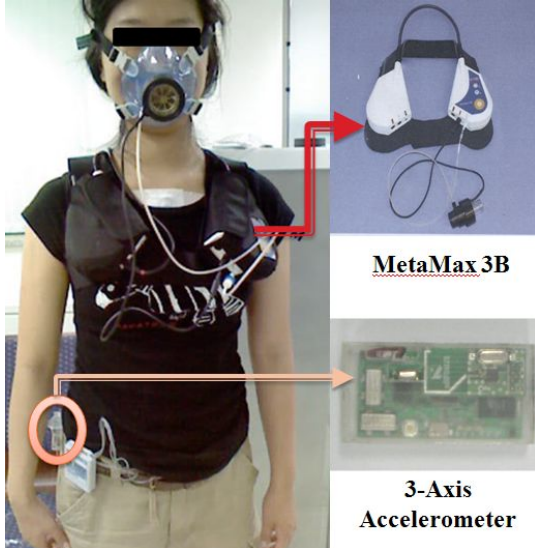


그림 1. 실험장비 착용사진

상일 경우는 달리는 동작을(평균속도 : 7.33km/h) 실시 하였으며 운동의 누적효과를 줄이기 위해서 7가지의 속도를 랜덤하게 선정하였다. 피험자는 트레드밀 속도에 따라 3분 동안 걷거나 뛰는 동작을 수행하였고 충분한 휴식을 통해 심박수가 안정됨을 확인한 후에 다른 속도를 수행하였다. <그림 1>은 호흡가스분석기와 가속도 센서모듈의 부착위치와 착용 모습을 나타낸다.

3. 분석 방법

각 속도 당 총 3분 동안 수행된 데이터들은 앞의 1분을 뺀 2분 동안의 데이터만을 사용하였다. 가속도 센서 데이터는 3축의 합인 벡터크기(SVM, Signal Vector Magnitude)를 이용하여 호흡가스분석기의 에너지소비량의 평균과 비교하였다.

$$SVM = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

또한 가속도 센서의 축 방향에 따른 에너지 소비에 대한 상관관계에 대해서도 분석하였다. SVM을 계산하기 전에 가속도 데이터는 1Hz의 High-pass 필터링을 통하여 정적가속도 성분을 제거 하였으며, 3~12Hz의 Low-pass 필터링을 단계적으로 실시하여 에너지 소비량과 가장 상관관계가 높은 주파수대역을 분석하였다. 그 결과 1~5Hz의 주파수 대역에서 가장 높은 관계를 나타냄을 알 수 있었으며 SVM은 1~5Hz의 주파수 대역의 가속도 데이터만을 이용하여 계산하였다. 모든 데이터는 Matlab 6.5(Mathwork Inc., USA)을 사용하여 계산 하였으며 통계분석은 SPSS ver. 12k(SPSS Inc., USA)프로그램을 이용하여 상관관계와 회귀분석을 하였다.

III. 결과 및 논의

1. 축 방향과 에너지 소비와의 상관관계

각 축 방향에 따른 에너지 소비량간의 상관관계의 결과는 <표 2>로 나타내었다. 모든 축 방향에서 에너지 소비와의 Pearson상관계수가 유의함을 나타내었고 3축의 SVM값이 상관관계가 가장 높음을 알 수 있었다. 또한 가속도 센서의 세 방향 중에 Y축(수직방향)이 에너지 소비량과의 상관관계가 가장 높게 나타내었다. 이는 Liao, Shiang와 Chang(2008)의 결과와 일치한다. Liao등은 손목, 허리, 발목에 3축 가속도계를 부착하여 심박수와 상관관계를 연구하였다. 그 결과 발목에서 가장 높은 상관을 보였으며 허리에서는 전후방향 $r=0.292$, 수직방향 $r=0.788$, 측방향 $r=0.676$ 의 결과를 나타내었다. 여기서 전후방향에서의 상관관계가 많은 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 심박수와 호흡가스분석기와 차이도 있을 수 있겠지만 무엇보다 부착위치의 차이가 크다. Liao등은 등허리에 가속도계를 부착한 반면에 본

표 2. 가속도 축 방향과 에너지 소비량간의 상관관계

Axis	Pearson Correlation						
	Anterior-posterior(X)	Longitudinal(Y)	Mediolateral(Z)	Sagittal Plane(XY)	Transverse Plane(XZ)	Frontal Plane(YZ)	XYZ
EE	0.640*	0.835*	0.686*	0.837*	0.687*	0.840*	0.841*

EE = Energy Expenditure.

*Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

연구에서는 우측 허리 부분의 장골능선 중양에 부착하여 보행에서 생기는 골반의 각도 변화가 가속도 센서에 영향을 미침으로써 전후 방향의 상관관계가 더욱 높음을 알 수 있었다. 따라서 트레드밀에서의 가속도계를 이용한 측정에서는 등허리 중양의 위치보다 장골능선의 부착위치가 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

2. 다중회귀분석

다중회귀분석은 걷는 동작과 달리는 동작을 나누어 분석하였으며 그 결과는 <표 3>과 같다. 에너지 소비량을 예측하기 위해 사용된 변수는 성, BMI, SVM이며 이것들을 이용하여 다중회귀식을 구현하였다. 다중회귀식의 결과를 통해서 남성이 여성에 비해 에너지 소비가 크게 나타났으며 걷는 동작보다는 달리기 동작에서 BMI가 더욱 크게 작용하고 반대로 SVM의 영향이 오히려 낮아짐을 알 수 있다. 또한 다중회귀모델의 적합도를 나타내는 결정계수와 상관계수가 걷는 동작에서의 회귀식에서 더욱 높게 나타났다. 이는 에너지 소비량을 예측 하는데 있어서 걷는 동작이 달리는 동작보다 더욱 정확함을 의미한다. 이러한 차이는 달리는 동작이 걷는 동작보다 step-frequency가 크기 때문에 같은 차단주파수를 적용함으로써 정확도가 비교적 낮게 나타났다고 추측된다. 그림 2는 실제 측정된 에너지소비량과 회귀식을 통해 예측된 에너지 소비량을 나타낸다. 두 그래프 모두 트레드밀 속도가 증가함에 따라 에너지 소비량도 함께 증가함을 알 수 있다.

Su, Wang, Celler, Ambikairajah 와 Savkin(2005)는 걷는 동작에서 트레드밀 속도에 따라 에너지 소비량이 비선형적 관계를 갖는 것에 착안하여 비선형 예측 방법인 Support Vector Regression(SVR)을 사용한 결과 선형회귀방법보다는 비선형회귀방법에서 에너지 소비량 예측에

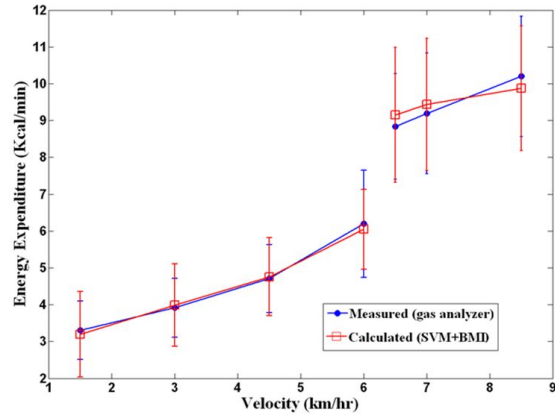


그림 2. 실제 측정된 에너지 소비량과 회귀식을 통한 에너지 소비량

대한 오차가 줄어들음을 확인하였다. 따라서 회귀식의 경우 더욱 정확한 에너지 소비량 예측을 위한 방법의 고찰이 필요 할 것이며 데이터 필터링 또는 더 많은 피험자의 정보를 활용하는 방안을 모색해야 할 것이다.

IV. 결론

본 연구는 가속도 센서를 사용하여 에너지 소비량을 예측하는 초기연구로써 시행되었다. 실험은 피험자가 트레드밀에서 총 7가지의 다른 속도(1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 6.5, 7.0, 8.5km/hr)로 호흡가스분석기와 3축 가속도 센서모듈을 허리에 부착하여 실시하였다. 피험자는 병적 사항이 없는 성인남성 6명과 성인여성 5명으로 구성되었으며 트레드밀 속도가 6.0km/hr 이하일 경우 걷는 동작을, 6.5km/hr 이상일 경우는 달리는 동작을 실시하였다. 실험결과에서 속도가 증가함에 따라 에너지 소비가 높아지고 그에 따라 가속도 센서의 3축의 합인 벡터크기(SVM)도 함께 증가를 나타내었고 이 관계를

표 3. 에너지 소비량 예측을 위한 다중회귀식

Multiple Regression Equation		Correlation Coefficient(R)	Coefficient of Determination(R ²)
Walking	$EE(W) = \text{Gender} \times 0.487 + \text{BMI} \times .288 + \text{SVM} \times .024 - 4.691$	0.936	0.876
Running	$EE(R) = \text{Gender} \times 0.735 + \text{BMI} \times .588 + \text{SVM} \times .012 - 8.673$	0.881	0.776

EE = Energy Expenditure(kcal/min)
Gender (male) = 1, Gender (female) = 0

피험자의 정보와 함께 다중회귀분석을 통해 수식화 하였다. 그 결과 걷는 동작에서의 상관계수와 결정계수는 ($R=0.936$, $R^2=0.876$) 달리는 동작 보다 높음을 알 수 있었다($R=0.881$, $R^2=0.776$).

현재의 결과는 피험자가 적은 관계로 에너지 소비량을 예측하는데 표준이 된다고 보기 어려우므로 추후연구로써 다양한 피험자의 데이터를 통한 분석으로 좀 더 정확한 에너지 소비량 예측에 대한 연구가 필요하겠다. 본 연구로 가속도 센서를 통한 에너지 소비량 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었고 이것을 이용하여 현대인들의 스포츠 활동을 통한 에너지 소비량을 알려 줌으로써 건강 유지 및 증진을 위해 매우 중요한 정보로 활용될 수 있다고 사료된다.

참고문헌

- 박재영, 박성태, 전태원, 임우섭, 이동기, 박익렬, 강현주(2004). 운동시 심박수를 이용한 대학생의 에너지 소비량 추정. *한국운동과학회지*, 13(3), 311-322.
- Chen, K. Y. & Sun, M. (1997). Improving energy expenditure estimation by using a triaxial accelerometer. *Journal of applied physiology*, 83(6), 2112-2122.
- Christensen, C. C., Frey, H. M. M., Foensteli, E., Aadaland, E., & Refsum, H. E. (1983). A critical evaluation of energy expenditure estimates based on individual O₂ consumption/ heart rate curves and average daily heart rate. *Am. J. Clin. Nutr.*, 37, 468-472.
- Davidson, L., McNeill, G., Haggarty, P., Smith, J. S. & Franklin, M. F. (1997). Free-living energy expenditure of adult men assessed by continuous heart-rate monitoring and doubly-labelled water. *British Journal of Nutrition*, 78, 695-708.
- King, G. A., Torres, N., Potter, C., Brooks, T. J. & Coleman, K. J. (2004). Comparison of Activity Monitors to Estimate Energy Cost of Treadmill Exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36(7), 1244-1251.
- Liao, L. T., Shiang, T. Y. & Chang, J. H. (2008). Acceleration on different body positions during running on a treadmill. ISBS Conference 2008, 94-97.
- Livingstone, M. B. E., Robson, P. J. & Totton, M. (2000). Energy expenditure by heart rate in children: an evaluation of calibration techniques. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32(8), 1513-1519.
- Meijer, G. A. L., Westerterp, K. R., Verhoeven, F. M. H., Koper, H. B. M. & Hoor, F. T. (1991). Methods to assess physical activity with special reference to motion sensors and accelerometers. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 38(3), 221-229.
- Meijer, E. P., Westerterp, K. R. & Verstappen, F. T. J. (1999). Effect of exercise training on total daily physical activity in elderly humans. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 80(11), 16-21.
- Moon, J. K. & Butte, N. F. (1996). Combined heart rate and activity improve estimates of oxygen consumption and carbon dioxide production rates. *J. Appl. Physiol.*, 81(4), 1754-1761.
- Motonaga, K., Yoshida, S., Yamagami, F., Kawano, T. & Takeda, E. (2006). Estimation of total daily energy expenditure and its components by monitoring the heart rate of Japanese endurance athletes. *J. Nutr. Sci. Vitaminol*, 52, 360-367.
- Sallis, J. F., Buono, M. J., Roby, J. J., Carlson, D. & Nelson, J. A. (1990). The Caltrac accelerometer as a physical activity monitor

- for school-aged children. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 22(5), 698-703.
- Su, S. W., Wang, L., Celler, B. G., Ambikairajah, E. & Savkin, A. V. (2005). Estimation of walking Energy expenditure by using support vector regression. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 2005. IEEE-EMBS, 3526-3529.
- Wang, L., Su, S. W., Celler, B. G. & Ambikairajah, E. (2005). Analysis of Orientation Error of Triaxial Accelerometers on the Assessment of Energy Expenditure. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 4(1), 3514-3517.
- Welk, G. J., McClain, J. J., Eisenmann, J. C. & Wickel, E. E. (2007). Field validation of the MTI Actigraph and Body-Media armband monitor using the IDEEA monitor. *Obesity*, 15(4), 918-928.

투 고 일 : 10월 31일
심 사 일 : 11월 6일
심사완료일 : 12월 2일