대한산업의학회지 제 16 권 제 3 호 (2004년 9월)
Korean J Occup Environ Med, 2004;16(3):303-315

작업 중 에너지 소모량 평가를 위한 Energy Expenditure Prediction Program의 타당도

부산의대 예방의학 및 산업의학교실, 고신의대 예방의학교실[1)]

강동묵 · 우지훈 · 전진숙[1)] · 이용환[1)] · 조병만 · 이수일

— **Abstract** —

Validity of the Energy Expenditure Prediction Program to Evaluate Energy Expenditure During Work

Dong Mug Kang, Ji-Hoon Woo, Jin-Sook Jun[1)], Yong-Hwan Lee[1)], Byung Mann Cho, Su Ill Lee

Department of Preventive and Occupational Medicine, College of Medicine, Pusan National University
Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Kosin National University[1)]

Objectives: The Energy Expenditure Prediction ProgramTM (EEPP) has been considered as a simple and quantitative method to evaluate physical work load. However, the adoption of EEPP directly to Korean workers is problematic because it was developed in a laboratory setting for Caucasians. Therefore, this study was conducted to validate EEPP for Korean workers.

Methods: The study subjects consisted of 60 workers from two factories. Cycle ergometer test was conducted to calculate physical work capacity, and heart rate monitoring was conducted to check heart rate during work. After observing the task, energy expenditure was estimated by EEPP.

Results: EEPP underestimated energy expenditure less than EEHR (energy expenditure checked by heart rate) did($p<0.0001$). The factors effecting EEHR were EEPP and task type. After dividing the task into regular and irregular tasks, the irregular task had a larger difference between the values from the two methods. We provided task specific regression models between EEHR and EEPP.

Conclusions: Because EEPP underestimated energy expenditure, it needs to be adjusted before use with Korean workers. It is suggested that different adjusting equations are formulated for regular and irregular tasks. Further study to develop a specific energy estimation model appropriate for Koreans is needed to obtain more precise estimation.

Key Words: Energy Expenditure Prediction Program, Physical work load, Validity

<접수일: 2004년 6월 9일, 채택일: 2004년 9월 7일>

교신저자: 강 동 묵 (Tel: 051-240-7741) E-mail: kangdm@pusan.ac.kr

* 이 연구는 2002년도 부산대학교 학술연구조성비에 의한 연구임.

서 론

작업 중 높은 육체적 부하는 질병을 야기하는 잠재적인 위험요소이며, 특히 심혈관계 질환과 근골격계 질환을 야기하는 것으로 알려져 있다(Hagberg, 1992; Winkel & Westgaard, 1992; Hallqvist et al, 2000). 지난 수십년간 노동생리학자들은 작업자들의 육체적 부하를 평가하는 연구를 계속해왔다. 작업 시 소모되는 에너지량을 평가하여 작업자의 능력을 초과하지 않도록 작업을 설계한다면, 수작업으로 중량물을 취급하는 것과 같은 육체적 작업을 과도한 피로나 육체적 부담 없이 수행할 수 있을 것이다.

일반적으로 육체적 부하 또는 에너지소모량을 측정하는 방법은 설문(Montoye, 1971), 보도계(pedometer) 또는 행위계(actometer)(Kemper & Verschur, 1977; Saris & Binkhorst, 1977), 심박측정기(Bradfield, 1977; Spady, 1980; Spurr et al, 1986) 및 중수(doubly labeled water)(Schoeller & Webb, 1984; Prentice et al, 1984)를 이용한 방법 등이 있다. 최근에는 이 방법들 중 중수를 이용한 방법이 하루 중의 전체 에너지 소모량을 측정하는 데에는 가장 정확하며 광범위하게 받아들여지는 것으로 알려져 있다. 그러나 이 방법은 첫째, 10~12일간의 평균 에너지 소모량을 정확하게 측정할 수 있다고 하더라도 전체적 에너지 소모량을 나타낼 뿐이지 문제되는 특정한 활동의 형태를 알아낼 수 없다는 단점과, 둘째, 분석을 위해서는 장비와 소모품 모두 너무 고가라는 단점을 가지고 있어(Spurr et al, 1988), 작업자를 대상으로 하여서는 잘 사용되지 않는다. 따라서 비교적 저가이면서도 작업자의 작업 형태를 파악할 수 있는 방법을 사용할 필요가 있다. 최근에 와서 하루 작업시간 동안의 육체적 부하를 전산화하여 특정 시간대의 특정 작업의 부하정도를 파악할 수 있도록 개발된 전자화된 장비의 이용이 늘고 있는데, 이 기법들은 호흡마스크를 이용한 산소소모량 측정과 심박수 측정이라는 방법으로 이루어진다. 이 방법들 중 호흡마스크를 이용한 산소소모량 측정을 통한 최대산소소비율($\%VO_{2max}$) 및 relative oxygen uptake (RVO_2) 측정은 작업기간 중 마스크를 착용하여야 함으로 작업자의 순응도가 떨어지고, 중작업, 유해물질에 대한 노출공정 및 밀폐공정 같은 경우 작업에 지장을 주기도 하고, 작업자를 위험상황에 빠뜨리기도 하여 현장에서 연구하기에는 부적합하며 주로 실험실연구에 적용되고 있다.

이에 반해 심박측정기를 이용한 심박변동과 에너지 예측법은 작업자들의 순응도가 높고, 비교적 저렴하기 때문에 현장 연구에 적용하기 쉬운 방법이다(Wu & Wang, 2002). 심박변동이 여러 가지 작업과 관련한 요소 (온열, 감정, 영양상태와 육체적 건강상태)와 관련이 있으므로 주의깊게 사용되어야 하지만, 여러 가지 요인에도 불구하고 relative heart ratio (RHR)는 $\%VO_{2max}$와 좋은 상관관계를 가지고 있고(ACSM, 1995; SjØgarrd et al, 1996), RVO_2와 동일하다는 것이 증명된 바 있어(Swain & Leutholtz, 1997; Pollock et al, 1998), 심박변동을 작업자들의 작업강도와 에너지 소모량 측정을 위해 사용하는 데는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. 그러나 심박측정기를 이용한 심박변동의 측정 또한 에너지 소모량을 추정하기 위해서는 복잡한 과정을 거쳐야 하는데, 우선 측정대상 각각의 육체적 능력이 상이함으로 개인의 육체적 능력을 측정하여야 하며, 이때 측정된 VO_{2max}를 기반으로 심박당 에너지 소모량을 구한 후, 작업시 측정한 심박수에 대해 심박당 에너지 소모량을 곱하는 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 이 과정에서 측정 대상 1인당 전문가가 2일 이상 측정과 관찰을 수행하여야 함으로 연구기간과 비용이 문제가 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 Michigan대학 인간공학 전문가들은 Energy Expenditure Prediction Program™ (EEPP, Ver @2.0.2, University of Michigan)을 개발하였다. EEPP는 작업자의 작업을 소단위의 직무로 세분한 후 각각의 빈도와 지속기간을 측정하여, 개별 작업당 소요된 에너지를 계산하며, 전체 에너지 소모량을 추정하는 프로그램이다. EEPP를 이용할 경우 비디오 촬영과 자와 저울 등을 이용한 현장 계측을 통해 작업자의 에너지 소모량을 추정할 수 있으며, 전체 작업 및 구체적 작업의 에너지 소모량을 각각 추정할 수 있어 문제공정의 파악과 현장개선의 효과 등을 판단하는 데에도 유용하게 활용할 수 있으며, 특히 전체 작업과 개별 작업이 각각 미국 National

Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)의 권고(NIOSH, 1981)에 따라 작업자를 보호하기 위해 적합한 지에 대해 평가할 수 있는 가장 간편한 도구이다. 그러나 미국인을 대상으로 실험실에서 개발된 프로그램인 EEPP를 한국의 작업자들에게 적용하는 것이 타당한 지에 대해서는 연구된 바가 없다. 따라서 이 연구는 미국인을 대상으로 실험연구를 통해 개발된 EEPP를 한국의 현장 작업자에게 적용하는 것이 타당한지에 대해 평가하기 위해, EEPP로 추정한 에너지 소모량과 심박수 측정을 통해 실제 측정한 에너지 소모량이 차이가 나는지를 비교하고, 실제 에너지 소모량 추정을 위한 교정 함수를 제시하고자 실시되었다.

대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구의 대상은 경남에 소재하는 1개 선박 엔진 제조 공장과 자동차 부품 조립 공장 작업자 남성 작업자 각각 40명, 총 80명을 대상으로 하였다. 선박 엔진 제조공장에 대해서는 2003년 5월과 6월 2개월에 걸쳐서 조사하였고, 자동차 부품 조립 공장에 대해서는 2004년 3월 1개월에 걸쳐서 조사하였다. 연구대상 80명 중 조사당시 작업이 없거나, 측정에 순응하지 않은 11명(13.8%)을 제외한 69명(86.2%)의 작업자에 대해 조사를 실시하였다. 조사대상 69명 중 최종연구대상으로 선정하기 위한 연구대상에서 제외하는 기준은 심박수에 영향을 미치는 요인인 심리적 스트레스, 고열작업, 작업이외의 과격한 육체적 활동 유무이었고, 작업일기와 작업관찰을 통해 조사하였다. 직무스트레스를 포함하여 심리적 영향을 미칠 수 있는 상황은 관찰되지 않았으며, 작업자 면담에서도 평소 작업과 달리 특이한 상황은 없었음을 확인할 수 있었다. 조사대상 69명 중 고열 작업자는 6명(8.7%)이었다. 점심시간에 축구, 달리기, 체력단련(weight training) 등 심박수에 영향을 주며 오후 작업의 피로도에 영향을 줄 수 있는 과격한 육체 활동을 한 작업자는 3명으로 조사대상 69명 중 3명(4.4%)이었다. 조사를 실시한 69명 중 심박수에 영향을 줄 수 있는 상황이 관찰된 9명을 제외한 60명을 최종 연구대상으로 하였다. 최초에 연구대상이었으나 최종적으로 연구에서 제외된 20명과 최종적으로 연구대상으로 선정된 작업자 60명의 일반적 특성을 비교하였을 때, 연령, 작업력, 키, 몸무게 및 주당 근무시간은 연구참여자와 비참여자간에 의미있는 차이를 보이지 않았다(Table 1).

2. 연구 방법

1) 설문 항목

자기기입식 설문을 통해 연구대상자들의 일반적 특성 및 작업관련 특성을 조사하였다. 일반적 특성에 관하여는 연령, 키, 몸무게, 학력, 결혼유무, 흡연, 음주 및 운동에 관련된 항목을 포함하였다.

2) 현장 관찰 및 작업일기 작성

작업자들이 작업하는 동안 연구자는 작업자의 작업을 관찰하여 심박수에 영향을 미칠 수 있는 고열작업 유무, 스트레스 및 심리적 문제 발생 유무, 작

Table 1. General characteristics between the participants and the non-participants

	non-participants (n=20)		participant (n=60)		
Variable	Mean	S.D.	Mean	S.D.	p-value
Age (yrs)	38.3	3.9	37.1	5.7	0.4204
Tenure (yrs)	15.6	2.4	14.9	3.2	0.4029
Height (cm)	169.0	5.4	171.4	6.2	0.1402
Weight (kg)	66.3	6.7	67.3	7.5	0.6492
work hour/week (hours)	55.2	5.2	55.9	10.8	0.6876

업과 관련없는 과격한 활동 유무를 조사하였다. 작업자에 대해서는 작업시작 전 작업일기를 배부하였고, 작성법에 관해 교육한 후 작업시간 중 작업의 형태와 시간에 대해 기록하게 하였고, 작업 이외의 특이사항 즉 점심식사 시간 및 휴식시간 중 운동여부 등을 기록하게 하였다.

3) 육체적 능력 평가

기본적인 육체적 능력을 평가하기 위해 자전거 에르고미터(Combi Co. Aerobike 75XL II®)를 이용하여 각 작업자의 목표심박수(최대 심박수의 75%), 이 때의 산소소모량(L/min, mL/min/kg)과 Physical Work Capacity (PWC, Watt)를 측정하였다. 측정은 소음과 진동이 없고 사람의 이동이나 조명 또는 환경의 변화 등 검사에 방해를 줄 가능성이 없는 밀폐된 장소에서 실시하였다. 측정에 소요되는 시간은 약 15분 정도이며, 기본 심박수의 측정을 위해 측정 시작 전에 5분 정도 안정을 취하도록 한 후 검사를 실시하였다. 자전거 에르고미터에 피검자의 연령과 몸무게를 입력하면 내장된 프로그램에 의해 계산된 목표심박수가 설정되고 이 후 약 10분간 자전거 에르고미터의 페달을 밟게 된다. 약 10분간의 검사가 진행되는 동안 내장 프로그램에 의해 계속해서 페달에 가해지는 부하가 증가하게 되고(램프부하 방식), 이때의 피검자의 심박동수가 피검자의 귓볼에 장착된 감지기를 통해 기록된다. 목표심박수에 도달할 때까지 페달의 부하가 계속해서 증가되며 이에 따라 심박동수는 직선적으로 증가하게 되는데, 이 검사의 결과를 바탕으로 피검자의 기본적인 신체적 능력을 파악할 수 있으며, 목표심박수에 다다른 경우의 에너지 소모량을 심박수로 나누어 심박당 에너지 소모량을 계산하였다. 이 심박당 에너지 소모량을 연구대상자의 작업 중의 심박동수에 곱하여 전체 작업시간 중의 총 에너지 소모량 및 평균 에너지 소모량을 측정하였다.

4) 작업 중 심박동수의 측정 및 심박수를 이용한 작업 중 에너지 소모량 측정

산소소모량과 심박동수는 직선적인 비례관계를 가지고 있다. 체내에 흡수된 산소는 식품의 대사와 에너지 대사에 사용되며 약 4.8 Kcal의 에너지를 방출하는데 산소 1L가 사용된다. 따라서 이러한 산소 섭취량과 심박동수의 직선적 비례관계를 이용하여, 심박수 측정을 통해 작업시 에너지의 소모량을 추정할 수 있게 된다. 즉 개인의 육체적 능력 측정을 통해 심박수와 산소소모량과의 기울기를 구하여 심박당 에너지 소모를 계산할 수 있고, 하루 작업 동안의 심박수를 이용하여 작업 동안의 에너지 소모량을 계산할 수 있다(McCormick, 1993). 심박수는 여러 연구자들이 에너지 소모량 계산을 위한 기준치(gold standard)로 사용하였다(Haskell et al, 1993; Luke et al, 1997; Strath et al, 2000; Rennie et al, 2001). 따라서 본 연구에서는 심박수를 이용한 에너지 소모량을 EEPP를 이용한 에너지 소모량 추정과 비교하기 위한 기준치로 사용하였다.

하루 노동일 중의 심박동수의 측정을 위해 측정 대상자에게 출근 시에 심박동수 측정기(Polar Electro Co, Finnland, S810®)를 부착하였다. 측정기기는 흉부에 부착하는 밴드형태의 심박 감지기와 감지기에 의해 감지된 신호를 실시간으로 기록하는 손목시계 형태의 기록기로 구성되어 있다. 모든 측정기기는 부착 후 연구자에 의해 정상작동 여부가 확인된 후에 작업을 시작하도록 하였다. 그리고 기기 부착 후 작업일기를 주어 퇴근할 때까지의 모든 구체적 업무를 적도록 하여 하루 작업동안 심박동수의 변화를 알 수 있도록 하였으며 부착하였던 심박동수 측정기와 작업일기를 작업 종료 후 수거하였다. 작업 종료 후 작업자는 작업장 인근의 연구실로 와서 작업동안 기록된 심박수를 컴퓨터로 전송받아 연구자와 같이 분석하였다. 연구자는 모니터에 기록된 심박의 변화와 작업일기를 비교하였고, 작업 중 특정한 상황의 변화가 있었는 지와, 모니터에 기록된 심박의 변화 중 특정하게 높거나 특이한 부분에 대해서 작업자의 의견을 청취하였으며, 작업 중 심리적 스트레스 상황이나 기타 심박변화에 영향을 미칠 수 있는 상황의 유무를 점검하였다.

최종적으로 하루 작업동안 기록된 심박수 중 점심시간과 휴식시간을 제외한 실작업 시간 동안의 기록만을 분석하였고, 육체적 능력 평가에서 추정한 개인별 심박당 에너지 소모량을 작업 중의 평균 심박동수에 대입하여 작업 중 에너지 소모량을 추정하였다.

5) EEPP를 이용한 작업 중 에너지 소모량 추정

EEPP는 미시간 대학교의 인간공학센터에서 개발되어 현재 각 국의 2000여 곳 이상에서 인간공학자, 기술자, 물리치료사, 작업치료사, 연구자 등에 의해 사용되고 있는 작업 중 에너지 소모량을 추정하기 위한 컴퓨터 프로그램이다. EEPP는 대사 추정 모델 (metabolic prediction model)(Garg et al, 1978)에 근거를 두고 있는데, 이 모델은 각 작업은 여러 개의 간단한 직무와 행위 요소로 구성되며, 각각의 행위 요소의 에너지를 알고 있을 때 각각의 직무를 수행하는 시간을 조사한다면 전체적인 작업의 평균 에너지 소모량을 계산할 수 있다는 가정에 근거한다. 각각의 직무와 행위요소의 에너지 소모량은 Garg(Garg et al, 1978)가 실시한 실험 결과 얻어졌으며, 이에 기반하여 예측 방정식을 만들었다. 프로그램을 이용하여 에너지 소모량을 계산하기 위해서는 각각의 직무에 대해 작업에 들어간 힘, 움직이는 거리, 빈도, 작업 자세, 직무를 수행하기 위해 소요되는 시간 및 중량물 취급 작업에 대해서는 중량물 취급 방법 등을 조사하여야 한다. 성 및 체중, 두 사람의 작업자가 작업을 실시하는 지 유무 또한 조사되어야 한다. 각각의 직무에서 소요되는 에너지 소모량이 계산된 후 전체 에너지 소모량이 계산된다. 이 예측 모델은 다음과 같은 방정식을 이용하여 만들어 졌다.

$$Ejob = Ebasal + \sum (Etaskj/Ttaskj)$$

Ejob = average energy expenditure rate of the job (Kcal/min)
Ebasal = metabolic energy expenditure rate necessary to maintain basal metabolism and posture (Kcal/min)
Etaskj = net metabolic energy expenditure of the jth task in steady state (Kcal)
Ttaskj = time duration of the jth task (min)

위의 방정식은 두가지 기본적인 요소로 이루어져 있다. 첫째는 작업과 관련이 없는 신체 에너지 요구를 충족시키기 위한 에너지 요구와 둘째는, 다양한 직무를 위해 순수하게 필요한 에너지 요구이다. 첫 번째 요소는 자세를 유지하기 위한 에너지와 관련이 있고, 이는 성, 체중 및 자세의 함수관계에 의해 결정된다. 둘째 요소는 전체 작업을 이루고 있는 다양한 직무가 요구하는 순수 에너지 소모량인데, 각각의 직무는 정적 및 동적 작업을 포함하고 있어 작업을 정교하게 관찰하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 심박동수 측정기를 부착한 작업자의 작업을 관찰하기 위해 각 작업자별로 작업을 하는 동안 video camera를 이용하여 작업을 촬영하였으며 연구원이 작업을 구성하고 있는 각 직무별로 작업자가 드는 물체의 하중, 몸 중심으로부터의 거리, 이동거리, 물체의 시작 높이와 종점의 높이, cycle time 등 EEPP를 이용하기 위해 필요한 자료를 측정하였다. 작업관찰과 EEPP를 통한 에너지 소모량 측정은 작업에 대해 전문적 지식을 가지고 있는 산업위생기사와 산업의학전문의가 같이 실시하였고, EEPP를 실시하기 전에 예비조사를 통해 EEPP에 대해 훈련한 후 본 연구 분석을 실시하였다.

6) 통계적 분석

심박수로 측정한 에너지 소모량과 EEPP로 추정한 에너지 소모량이 일치하는 지를 검증하기 위해 paired t-test를 실시하였다. 양 방법간의 차이를 확인한 후 차이의 원인을 알기 위해, 심박수로 측정한 에너지 소모량에 영향을 미치는 EEPP 외의 요인들을 연속변수의 경우 Pearson's correlation coefficient를 구하였고, 이산변수의 경우에는 t-test와 ANOVA test를 실시하였다. 단변량 분석결과 밝혀진 EEPP 외에 심박수로 측정한 에너지 소모량에 영향을 미치는 변수 중 최종적으로 영향을 미치는 요인들을 확인하기 위해 다변량 선형회귀 분석을 실시하였다. 그 이후 EEPP를 한국인의 작업장에 사용하기 위해 보정식을 구하였고, 보정식은 작업의 유형에 따라 규칙적 · 반복적 및 불규칙적 작업을 나누어 선형 회귀분석을 실시하였다. 통계는 SAS v8.1 프로그램을 사용하였고, 통계학적 유의수준은 0.05로 하였다.

결 과

1. 심박수 및 EEPP로 측정한 에너지 소모량 비교

심박수와 EEPP 두 방법을 통한 에너지 소모량의 추정이 차이가 있는지를 보기 위해 paired t-test를 실시하였다(Table 2). 심박수로 측정한 에너지 소모량의 평균은 5.0±0.8 Kcal이었고, EEPP로 예측한 에너지 소모량은 3.9±0.6 Kcal로 EEPP가 실제의 에너지 소모량 보다 낮게 예측하였고 통계적으로 유의하였다($p<0.0001$).

2. EEPP 외에 심박수로 측정한 에너지 소모량에 영향을 미치는 요인 (단변량 분석)

1) 심박수로 측정한 에너지 소모량과 연속변수들의 관계

연속변수들 간의 Pearson 상관계수를 구하였다(Table 3). 심박수로 측정한 에너지 소모량은 EEPP 외에 키 및 몸무게와 상관관계가 있었고, 통계적으로 유의하였다($p<0.05$).

2) 심박수로 측정한 에너지 소모량과 이산변수와의 관계

심박수로 측정한 에너지 소모량에 영향을 미치는 요인 중 이산변수들과의 관계를 알아보기 위해, t-test와 ANOVA를 실시하였다(Table 4). 심박수로 측정한 에너지 소모량은 규칙적 작업에 비해 불규칙적 작업이 더 높게 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p<0.0001$). EEPP가 작업의 형태에 따라 에너지 소모량을 다르게 예측한다면, 이를 보정하기위하여 하나의 회귀식을 만들 것인지, 작업의 형태를 구분하여 따로 회귀식을 구할 것인지를 결정하여야 한다. EEPP와 심박수로 측정한 에너지 소모량이 작업의 형태에 따라 차이가 나는 지를 보기 위해, 작업의 형태별로 paired t-test를 실시하였다(Table 5). 규칙적 · 반복적인 작업의 경우, 에너지 소모량은 심박수를 통한 방법에서는 4.6±0. Kcal (Mean ± S.D.)이었고, EEPP를 통한 방법에서는 4.1±0.6 Kcal (Mean±S.D.)로 심박수를 통한 방법이 높게, 유의한 차이를 보였다. 불규칙적인 작업의 경우, 심박수를 통한 방법에서는 에너지 소모량은 5.6 ± 0.9 Kcal (Mean±S.D.)이었고, EEPP를 통한

Table 2. Energy expenditure estimates between methods using heart rate and EEPP*

Variable	Mean	S.D.	p-value
Energy expenditure estimate by heart rate	5.0	0.8	<.0001
Energy expenditure estimate by EEPP*	3.9	0.6	

* energy expenditure prediction program

Table 3. Correlations between energy expenditure by EEHR† and other variables

	EEHR†	EEPP‡	Age	Tenure	Weight	Height	BMI
EEHR†	1.00						
EEPP‡	0.26*	1.00					
Age (yr)	-0.04	0.06	1.00				
Tenure (yr)	-0.24	-0.06	0.28*	1.00			
Weight (kg)	0.26*	0.31*	-0.24	-0.23	1.00		
Height (cm)	0.30*	0.30*	-0.44**	-0.20	0.53***	1.00	
Body mass index (BMI)	0.06	0.14	0.05	-0.13	0.78***	-0.13	1.00

* $p<0.05$ ** $p<0.01$ *** $p<0.001$

† estimated energy expenditure by heart rate

‡ estimated energy expenditure by energy expenditure prediction program

방법에서는 3.7±0.9 Kcal (Mean±S.D.)로 심박수를 통한 방법이 높게 유의한 차이를 나타내었다. 두 방법으로 측정한 에너지 소모량 간의 차이는 불규칙적 작업에서 더 컸다.

따라서 EEPP는 작업의 형태에 따라 예측치가 차이가 나며 규칙적 · 반복적인 작업에 비해 불규칙적인 작업에서 에너지 소모량을 실제보다 더 낮게 예측함을 알 수 있었다. 따라서 작업의 형태를 구분하여 예측식을 따로 제시하는 것이 타당한 것으로 판단하였다.

3. 심박수로 측정한 에너지 소모량에 영향을 미치는 요인 (다변량 분석)

EEPP 외에 심박수로 측정한 에너지 소모량에 영향을 미치는 요인을 확정하기 위해, 다변량분석을 실시하였다. 단계적 회귀 분석을 실시한 결과 최종 모델에는 EEPP 외에 작업의 형태가 실제 에너지 소모량과 관련이 있었다(Table 6). 따라서 작업의 형태를 분리하여 각각의 회귀식을 구하는 것이 타당한 것으로 판단하였다.

4. 심박수 및 EEPP로 측정한 에너지 소모량 간의 회귀분석

EEPP로 구한 에너지 소모량을 이용하여 심박동수로 구한 실제의 에너지 소모량을 추정하기 위해서, 심박수를 종속변수로 하고 EEPP를 독립변수로 하여 회귀식을 구하였다(Table 7). 작업이 규칙적 · 반복적 작업일 경우의 회귀식은 Y=4.52+0.06 x EEPP (Kcal)이었고, 작업이 반복적이지 않으며 불규칙적인 작업일 경우의 회귀식은 Y=2.47+0.83 x

Table 4. Variables affecting energy expenditure checked by heart rate

Variables		N	Mean	S.D.	p-value
Work type	regular	33	4.6	0.5	<.0001
	irregular	27	5.6	0.9	
Education (yrs)	≤ 12	50	5.0	0.7	0.4405
	> 12	10	4.7	1.1	
Smoking	non-smoking	19	4.9	0.8	0.6760
	ex-smoking	13	5.0	0.8	
	present smoking	28	5.1	0.9	
Drink	drinking	48	5.0	0.8	0.8481
	non drinking	12	5.0	1.1	
Marriage	unmarried	8	5.3	1.2	0.4337
	married	52	5.0	0.8	
Exercise	regular	41	5.0	0.8	0.7587
	irregular or no	19	5.0	0.9	

Table 5. Energy expenditure estimates between methods using heart rate and energy expenditure prediction program according to work type

Model	Variable	Mean	S.D.	p-value
Regular work type	Energy expenditure estimate by heart rate	4.6	0.5	<.0001
	Energy expenditure estimate by EEPP*	4.1	0.6	
Irregular work type	Energy expenditure estimate by heart rate	5.6	0.9	<.0001
	Energy expenditure estimate by EEPP*	3.7	0.9	

EEPP (Kcal)이었다.

고 찰

산업 발달의 결과로 이룩된 기계화와 자동화로 육체적 작업강도가 높은 노동이 줄어들었음에도 불구하고, 육체적 작업강도는 여전히 많은 나라에서 문제가 되고 있다. 우리나라에서는 IMF 이후 구조 조정, 작업인원수의 감소, 일인당 작업물량의 증가, 작업시간의 연장 등 전반적인 작업강도는 증가했을 것으로 생각되나, 아직까지 작업현장에서 작업 특성을 고려한 적절한 작업강도의 기준은 물론 이를 평가하려는 시도조차 많지 않은 것이 사실이다. 이에 본 연구에서는 작업형태에 따른 육체적 작업강도의 크기를 파악하여, 작업자를 보호하고 건강한 생산활동을 유지할 수 있는 기반을 마련하고자, 생산과정 중의 전반적인 육체적 작업강도를 간편하게 평가할 수 있는 도구인 EEPP의 국내 적용 가능성 여부를 평가하고자 하였다.

육체적 작업강도를 평가하는 방법 중 설문지는 가장 간편하게 작업강도를 평가할 수 있는 방법으로 대규모 인구집단에 대한 역학연구에 활용된다. 외국에서는 작업강도를 평가하려는 목적으로 여러 종류의 설문지가 개발되어 있으며, 그 중에서 주로 Tecumseh questionnaire, Baecke questionnaire와 Stockholm public health questionnaire 등은 타당도와 신뢰도가 검증된 바 있다(Baecke et al, 1982; Jacobs et al, 1993; Mahoney & Freedson, 1990; Ola et al, 2002). 국내에서도 이동준 등(2002)은 육체적 작업강도를 간편하게 평가하기 위해 설문지를 개발하였고, 타당도와 신뢰도를 검증한 바 있다. 그러나 설문지가 가장 간편하게 작업강도를 평가할 수 있는 도구라고 하더라도, 주관성을 배제할 수 없는 문제점을 가지고 있으며 육체적 활동의 자세한 양상과 에너지 소모량 등을 정확하게 측정할 수 없다는 한계를 가지고 있다(Caspersen, 1989). 육체적 부하를 측정할 수 있는 생리학적 방법 중 심박수는 육체적 피로도의 한 지표로써 작업강도로 인한 신체의 피로도를 객관적으로 측정할 수 있는 지표이며, 현재까지 육체적 작업강도를 측정하는 가장 쉽고 간편한 객관적인 지표로 이용되고 있다(Montoye et al, 1970). 산소소모량은 에너지 소모량과 직접적인 관련이 있지만 실제 작업상황에서는 측정이 매우 어려우므로 작업시 에너지소모량을 추정하기 위해서는 측정이 용이한 심박동수가 주로 사용된다.

Table 6. Multiple linear regression between energy expenditure by using heart rate and other covariates

Variable	β	S.E.	p-value
Intercept	1.31	0.76	0.0906
Energy expenditure by EEPP*	0.56	0.16	0.0009
Work type : irregular vs regular	1.02	0.19	<.0001

R^2=0.41

* estimated energy expenditure by energy expenditure prediction program

Table 7. Linear regression models between energy expenditures by using heart rateand energy expenditure prediction program according to work type

Model	Variable	β	S.E.	p-value
Regular work type	Intercept	4.52	0.41	<.0001
	Energy expenditure by EEPP*	0.06	0.10	0.0556
Irregular work type	Intercept	2.47	1.03	0.0262
	Energy expenditure by EEPP*	0.83	0.27	0.0068

* Energy expenditure prediction program

신체적인 근육활동이 시작되면 그 작업량에 따라서 근육으로 공급되는 순환혈액량이 증가되는 동시에 혈액 속에 함유된 산소의 이용률이 증가된다. 순환혈액량이 증가되는 것은 심박출량이 증가하고, 활동하는 근육에 분포된 소동맥이 확장하고 그 대신에 피부 및 내장에 분포된 혈관들이 상대적으로 수축을 일으키기 때문이며(Robinsosn, 1968), 심박출량이 증가하는 것은 구출량(stroke volume)이 증가되는 것 보다는 주로 심박수가 증가되기 때문에 근육활동시의 산소 운반 등의 변화를 가장 간편하게 알 수 있는 방법이 심박수를 측정하는 것으로 알려져 있다(Bevergard & Shephard, 1967; Braunwald et al, 1967; Astrand & Rodahl, 1986). 그러나 심박수를 육체적 부하지표로 사용하고자 할 때는 여러 가지 주의할 점이 있다. 안정시 및 중등도 이하의 작업을 할 때의 심박수는 신체활동부위, 작업의 종류(정적 또는 동적), 환경온도, 정서적 불안 등 여러 가지 요인에 의하여 어느 정도 영향을 받는다. 또한 심박수를 측정하는 방법은 비교적 저렴한 장비를 사용하여 접근도가 높지만, 작업 하루 동안의 에너지 소모량을 측정하기 위해서는 전문가가 직접 조사 · 평가하여야 하는 시간소모적인 작업이다. 따라서 보다 간편하면서도 객관적이고 정량적인 에너지 소모량 평가도구가 필요하다.

미시간 대학의 Garg는 실험실에서 통제된 조건하에서, 작업의 다양한 형태를 실험하여 EEPP를 만들었다. 그 후 Garg는 타 연구자들에 의해 측정되거나 추정된 에너지 소모량(Cotes & Meade, 1960; Graimby & Soderhom, 1962; Givoni & Goldman, 1971; Kamon, 1973; Walt et al, 1973)과 EEPP에 의해 추정된 에너지 소모량과의 비교를 통해 EEPP의 타당도를 검토하였으며, 48개의 작업을 수행하여 직접 측정한 에너지 소모량과 EEPP를 통해 추정한 에너지 소모량과의 비교를 통해 EEPP의 타당도를 검증한 바 있다(Garg et al, 1978). 그 이후 EEPP는 간편하게 작업의 에너지 요구량을 평가할 수 있는 기법으로 사용되었다. 그러나 EEPP가 서구인의 체력에 기반하여 작업 중 에너지 소모량을 추정한 것으로 EEPP를 우리나라의 작업자에게 적용하는 것이 타당한 지에 대한 연구가 필요하였다. 본 연구에서는 심박수를 이용하여 작업시 직접 측정한 자료를 바탕으로 계산한 에너지 소모량을 기준치(gold standard)로 사용하여, EEPP를 통해 추정한 에너지 소모량과의 회귀분석을 통하여 타당도를 평가하였다. 그러나 심박수를 이용한 에너지 소모량을 기준치로 사용하기 위해서는 심박수에 영향을 미칠 수 있는 조건들을 통제한 후 EEPP의 타당도 분석을 실시할 필요가 있다.

심박수에 영향을 미치는 조건에 대한 통제는 다음의 순서를 밟았다. 먼저 작업 시작 전 작업자 면담을 통해 평소와는 달리 정서적 불안이나 변화를 일으킬 만한 사건의 유무를 물었고, 작업 중 관찰을 통해 특정한 사건의 유무를 확인하였으며, 작업 종료 후 하루 중 정서적 변화를 일으킬 만한 사건의 유무를 재확인 하였다. 확인 결과 연구대상자 전원에게 평소와는 다른 특정한 사건이 없었다. 둘째로 환경온도를 관찰하여 고온 작업자의 경우에는 분석에서 제외하였다. 본 연구에서 고온 작업자를 제외하지 않은 경우(n=69) 심박수 및 EEPP로 추정한 에너지 소모량간의 상관계수는 0.21(p=0.075)이었는데, 고온 작업자를 제외한 경우(n=63) 상관계수는 0.24(p=0.0574)로 상관성이 높아져서 고온 작업이 심박수에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 셋째로 점심시간 동안의 과격한 운동 등의 작업과 관련이 없는 활동이 심박수에 영향을 미칠 수 있는 경우를 제외하였다. 고열작업자를 제외한 후 전체 작업자 중 3명의 작업과 관련없는 과격한 육체활동을 한 경우를 제외하였을 때(n=60), 상관계수는 0.26(p=0.0458)으로 상관성이 높아져 육체활동이 심박수에 영향을 줌을 알 수 있었다.

EEPP를 보다 정확하게 적용하기 위해서는 작업관찰을 정교하게 할 필요가 있다. 특히 규칙적 · 반복적인 작업의 경우에는 전체 작업을 단순화하여 각각의 직무와 행위요소로 나누기가 간편한 데 반해, 불규칙적인 작업의 경우에는 하루 중 작업이 동일하지 않고 반복되지 않은 다양한 작업으로 구성되어 있어 작업관찰이 용이하지 않다. 본 연구에서는 작업이 불규칙적이라고 판단하였던 경우에는 연구참여자에 대해 작업일기를 보다 꼼꼼하게 작성하도록 교육하였고 작업종료 후에도 심박수 모니터를 검토하면서 연구참여자와 함께 작업의 형태를 점검하여 작업관찰을 정확하게 하고자 하였다.

심박수에 영향을 미치는 요인을 제거한 후 두 방법으로 추정한 에너지 소모량의 차이를 보았다. 두

방법간에는 통계적으로 유의한 차이가 있었으며, EEPP는 실제 보다 에너지 소모량을 낮게 추정함을 알 수 있었다. NIOSH에서는 직무를 설계할 때 작업자들이 단기 최대 신체 작업역량의 33% 보다 높은 조건에서 8시간 계속 작업을 하지 않도록 해야 한다고 지적하고 있다. 이것은 건강한 남성 작업자의 경우 5 Kcal/min을 초과하는 비율로, 건강한 여성 작업자의 경우에는 3.5 Kcal/min을 초과하는 비율로 작업해서는 안된다는 것을 의미한다. 간간이 수행되어지는 역동적인 작업인 경우 (8시간의 작업기간 동안 1시간이나 그 이하의 작업), NIOSH는 권장 에너지 소비한계를 건강한 남성과 여성 작업자에 대해 각각 9 Kcal/min과 6.5 Kcal/min으로 할 것을 제시하고 있다. 8시간 지속적 노동의 허용기준인 5 Kcal/min을 기준으로 하였을 때, 심박수로 측정한 에너지 소모량의 경우에는 28명(46.7%)이 기준을 초과하였으나, EEPP로 추정한 에너지 소모량의 경우 작업자 4명(6.7%)이 기준을 초과한 것으로 나타났다.

EEPP가 에너지 소모량을 낮게 추정하는 이유를 파악하기 위해, 심박수로 측정한 에너지 소모량에 영향을 미치는 EEPP 외의 요인을 분석하였다. 다변량 분석결과 EEPP와 작업의 종류만이 실제 에너지 소모량과 관련이 있었다. 작업의 종류별로 EEPP로 추정하는 에너지 소모량과 심박수로 측정한 에너지 소모량간의 관계가 차이가 있는지를 보기 위해 작업의 종류를 분리하여 분석하였다. 작업이 규칙적인 경우와 불규칙적인 경우를 분리하였을 때, 작업의 종류에 따라 EEPP가 에너지 소모량을 다르게 예측하였고 특히 불규칙적인 경우에 양 방법간의 차이는 더 커짐을 알 수 있었다. 그 이유는 불규칙적 작업의 경우 중량물 취급이나 육체적으로 힘을 쓰는 작업이 다수 포함되어 있기 때문으로 판단된다. 서양인과 동양인의 육체적 능력은 차이가 나는 데, 육체적 능력의 차이는 반복적이고 가벼운 작업 보다는 중량물 취급과 같은 육체적으로 힘든 작업에서 더 많이 발생할 수 있다. 따라서 서구인의 생리적 능력에 기반하여 만들어진 EEPP가 가벼운 작업에 비해 힘든 작업에서, 한국 작업자들의 에너지 소모량을 실제 보다 더 낮게 예측하는 것은 동서양간의 생리적 차이에 기반하였을 가능성이 높다. 작업의 종류를 규칙적·반복적 작업과 불규칙적인 작업으로 나누어 보았을 때 상관계수는 중등도 이상의 상관관계를 보여, 작업의 종류를 나누지 않았을 때보다 높게 나타났다. 이상의 분석을 기초로 하여 작업의 종류를 나누어서 EEPP에 대한 보정식을 만드는 것이 타당한 것으로 판단하였다.

본 연구에서 EEPP와 심박수로 측정한 에너지 소모량간의 상관계수는 규칙적·반복적 작업 및 불규칙적 작업에서 각각 0.41($p=0.0174$) 및 0.63($p=0.0002$)으로 모두 통계학적으로 의미있는 결과를 보였다. 에너지 소모량을 측정하는 방법간의 상관계수는, Tecumseh 직업적 활동 및 Minnesota leisure 기간 활동에 대한 설문은 Caltrac 가속도계를 기준으로 비교하였을 경우(Montoye et al, 1996) 0.40($p<0.05$) 이었고, 심박수를 중수와 비교할 때는(Schultz et al, 1989) 0.73($p<0.05$)이었다. 따라서 본 연구에서 관찰된 상관계수는 설문보다는 높고 직접 측정법 보다는 낮은 정도에 있는 것으로 판단되며, 이는 EEPP가 직접 측정법과 설문법의 중간정도의 정확성을 가지고 있는 점과 일치한다.

이 연구는 EEPP 등 에너지 소모량을 간편하게 추정할 수 있는 방법의 국내 적용가능성에 대한 연구이다. 한국인에 대한 EEPP의 적용에 대한 연구는 거의 없었는데, 한국인에 대해 육체적 작업강도에 대해 연구된 경우는 주로 실험실에서 산소소모량이나 심박수를 이용하여 실험하거나, 현장에서 측정할 경우 연구대상의 수가 제한적인 경우가 대부분이다(강건우와 박수규, 1996; 김재원 등, 1998; 이유정 등, 1998; 정민근 등, 2000; 이준엽과 김철홍, 2001). 이들 연구 중 현장에서 측정을 한 경우는 벌목작업자(강건우와 박수규, 1996; 김재원 등, 1998), 자동차 조립작업자(이유정 등, 1998; 이준엽 와 김철홍, 2001), 음료등짐 작업자(정민근 등, 2000) 등을 대상으로 하였으며, 연구대상의 수는 3명에서 10명 정도의 수준이다. 특정 자세나 상황에 대해 연구한 경우는 방진복 착용시 작업강도의 변화(권오경, 1998), 쪼그려 앉은 자세(이인석, 1998), 자세에 따른 어깨 근육의 문제(김정룡 등, 1999), 작업강도의 생리적 지표(김재현과 김흥기, 2002) 등에 대한 연구가 있고, 이들 연구에서는 실험실에서 10명 안팎의 연구대상으로 실험을 실시하였다. Norgan(1996)은 1990년까지 수행된 에너지 소모량 예측에 관한 연구들에 대해 고찰하면서, 대부분

의 연구가 표본수가 작아서 교란변수를 통제하지 못한다고 지적한 바 있다. 앞서의 대부분의 연구대상이 10여명 전후의 연구이었던 것에 반해 이 연구는 최종 분석대상이 60명이어서 비교적 표본수가 크다는 장점을 가지고 있다. 또한 이 연구가 EEPP의 타당도를 평가하기 위해 기준치에 영향을 미칠 수 있는 변수들을 관찰하고 통제하였다는 장점을 가지며, 육체적 작업강도 평가의 필요성이 점증하고 있는 상황에서 현장적용성이 높은 도구에 대한 타당도 평가를 실시하였으며 보정식을 제시하였다는 점은 본 연구의 성과로 생각된다.

연구결과 EEPP와 실제의 에너지 소모량 간에는 차이가 있고, EEPP를 현장에 적용하기 위해서는 생리적인 차이를 감안하여 작업의 형태를 나누고 보정식을 이용하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 그러나 이 연구는 남성에 대한 연구로 여성에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 한국인의 생리학적 특성에 기반하여 조건을 통제한 후 대사추정모델 등 생리학적 및 생역학적 모델에 근거한 실험연구를 일차로 실시하여 모델을 개발하고, 이 모델의 현장 적용타당성을 검증하여 한국적인 에너지 소모량 예측 프로그램을 개발하는 것이 보다 정확성을 기할 수 있는 방법이 될 것이다. 더하여 본 연구에서 나타난 EEPP와 실제의 에너지 소모량 사이의 차이를 보정하기 위해서는 공정을 단위작업으로 나누고 단위작업에서도 개개의 동작으로 나누어서 차이의 정도를 평가하여 보정하는 방법을 고려할 수 있다. 향후에는 본 연구 결과를 기초로 하여 작업자의 에너지 소모량을 측정하고, 이 측정치와 작업 후 피로도 및 건강관련 지표와의 연관성에 대한 연구를 통해 한국인의 노동생리학적 기준을 마련하는 작업이 필요하다고 생각한다.

요 약

목적: 육체적 부하 또는 에너지 소모량을 측정하기 위한 도구로, 생체역학적 방법론에 기반하여 작업을 관찰하고 간단한 계측을 통해 작업자의 에너지 소모량을 추정할 수 있는 Energy Expenditure Prediction Program™ (EEPP)이 있다. 그러나 EEPP가 서구인을 대상으로 실험실에서 개발된 프로그램이라는 점에서 그대로 한국의 작업자들에게 적용하기에는 문제가 있다. 따라서 한국의 작업자를 대상으로 EEPP를 이용하여 에너지 소모량을 예측하였을 때 실측 에너지 소모량과 일치하는 지를 평가하고, 한국인에 맞는 교정 함수를 제시하고자 본 연구를 실시하였다.

방법: 연구대상은 경남에 소재하는 1개 선박엔진 제조 공장 작업자 40명, 자동차 부품 조립 공장 작업자 40명 등 총 80명을 대상으로 하였으며, 측정에 순응하지 않거나 심박수에 영향을 주는 환경에 노출된 경우의 20명의 작업자는 제외하여 60명을 분석하였다. 자전거 에르고미터를 이용하여 각 작업자의 육체적 작업능력을 평가하고, 심박측정기를 이용하여 작업 시 심박동수를 측정하여 에너지 소모량을 계산하였다. 작업자 별로 작업을 video camera를 이용하여 촬영하고, 작업을 구성하고 있는 직무별로 물체의 하중, 거리, 높이, 빈도, cycle time 등을 측정한 후 EEPP를 이용하여 에너지 소모량을 추정하였다.

결과: EEPP는 심박수에 비해 에너지 소모량을 낮게 예측하였다($p<0.0001$). 작업의 형태를 규칙적 · 반복적 작업과 불규칙적 · 비반복적 작업으로 나누어 두 방법간의 에너지 소모량 차이를 보았을 때, 불규칙적 작업에서 두 방법간의 차이가 컸다. 심박수를 이용한 에너지 소모량을 종속변수로 하고, EEPP로 추정한 에너지 소모량을 독립변수로 하여 선형회귀분석을 한 결과, 규칙적 · 반복적 작업일 경우 및 불규칙적 · 비반복적 작업일 경우의 회귀식은 각각 $Y=4.52+0.06 \times EEPP$ 및 $Y=2.47+0.83 \times EEPP$이었다.

결론: EEPP를 이용한 에너지 소모량 추정치는 실측치와 차이가 있어 보정을 하여야 하며, 규칙적 작업과 불규칙적인 작업을 구분하여 보정식을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 더 정교한 작업시 에너지 소모량 추정을 위해서는 한국인에 맞는 예측방법을 개발할 필요가 있다.

참고문헌

강건우, 박수규. 벌채작업에서의 작업강도 측정연구. 한국임학회지 1996;85(3):396-408.

권오경, 등창심실. 연구밀폐형 방진복 착용시 작업강도에 따른 온열생리적 반응 및 젖산농도에 대한 Head Cooling 의 영향. 한국생활환경학회지 1998;5(1):73-82.

김정룡, 박지수, 박창순, 편흥국. 작업자세에 따른 어깨근육의 작업부하 측정. 대한산업공학회지 1999;25(2):266-73.

김재원, 이준우, 박범진, 송태영. 체인톱을 이용한 낙엽송 벌복작업에서의 작업강도분석. 한국임학회지 1998;87(2):121-30.

김재현, 김흥기. 작업부하에 따른 생리적 반응들에 관한 연구. 산업경영시스템학회지 2002;25(1):9-13.

이동준, 강동묵, 고상백, 김정원, 장준호, 김종은 등. 육체적 작업강도 평가 설문지의 신뢰도와 타당도. 대한산업의학회지 2003;15(4):388-400.

이유정, 여윤신, 정민근. 자동차 조립라인에서의 볼트 체결 작업에 대한 생리적 작업 부하 평가. 한국경영과학회 학술대회 논문집. 1998;1:1-6.

이인석, 정민근. 쪼그려 앉은 작업자세에서의 작업부하 평가. 대한산업공학회지 1998;24(2):167-73.

이준엽, 김철홍. 자동차 조립작업 시 작업자세, 작업/휴시비율, 작업형태에 따른 작업부하의 변화에 관한 연구. 산업경영시스템학회지 2001;24(69):51-64.

정민근, 이유정, 이인석. 음료 운반 등짐 작업의 생리적 작업부하 평가. 대한산업공학회지 2000;26(2):110-6.

ACSM (American College of Sports Medicine). ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription, 5th ed. Williams & Wilkins, Baltimore, 1995.

Astrand PO, Rodahl K. Measurement of Oxygen Uptake: the Douglas-bag Method. In: Textbook of Work Physiology. McGraw-Hill Book Co, New York, 1986. pp 613-4.

Baecke JAH, Burema J, Frytters JER. A short questionnaire for the measurement of habitual physical activity in epidemiological studies. Amer J Clin Nutri 1982;36:932-42.

Bevergard BS, Shephard JT. Regulation of the circulation during exercise in man. Physiol Rew 1967;47:178-80.

Bradfield RB. A technique for determination of usual daily energy expenditure in the field. Am J Clin Nutr 1977;24:1148-54.

Braunwald E, Sonnenblick EH, Ross J, Glick G, Epstein SE. An analysis of the cardiac response to exercise. Circulation Res 1967;20:44-58.

Caspersen DJ. Physical activity epidemiology: concepts, methods, and applications to exercise science. Exerc. Sports Sci Rev 1989;17:423-73.

Cotes JE, Meade F. The energy expenditure and mechanical energy demand in waling. Ergonomics 1960;3:97.

Garg A. Chaffin DB, Herrin GD. Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs. Am Ind Hyg Assoc J 1978;39:661-74.

Givoni B, Goldman RF. Predicting metabolic energy cost. J Appl Physiol 1971;30:429.

Godin G, Shephard RJ. A simple method to assess exercise behavior in the community. Can J Appl Sport Sci 1985;10:141-6.

Graimby G, Soderhom B. Energy expenditure of men in different age groups during level waling and bicycle ergometry. Scan J Clin Lab Invest 1962;34:559.

Hagberg M. Exposure variables in ergonomic epidemiology. Am J Ind Med 1992;21:91-100.

Hallqvist J. Moller J, Ahlbom A, Diderichsen F, Reuterwall C, de Faire U. Does heavy physical exertion trigger myocardial infarction? A case-crossover analysis nested in a population-based case-referent study. Am J Epidemiol 2000;151(5):459-67.

Haskell WL, Yee MC, Evans A, Irby PJ. Simultaneous measurement of heart rate and body motion to quantitate physical activity. Med Sci Sports Exerc 1993;25:109-15.

Jacobs D, Anisworth B, Hartman T, Leon A. A simultaneous evaluation of ten commonly used physical activity questionnaire. Med Sci Sports Exerc 1993;25:81-91.

Kamon E. Laddermill and ergometry: a comparative summary. Hum Factors 1973;15:75.

Kemper HCG, Verschur R. Validity and reliability of pedometers in habitual activity research. Eur J Appl Physiol 1977;37:71-82.

Luke A, Maki KC, Barkey N, Cooper R, McGee D. Simultaneous monitoring of heart rate and motion to assess energy expenditure. Med Sci Sports Exerc 1997;29:144-8.

Mahoney M, Freedson P. Assessment of physical activity from Caltrac and Baecke questionnaire techniques. Med Sci Sports Exerc 1990;22:s80.

McCormick EJ. Human Factors in Engineering and Design 4th ed. McGraw-Hill, New York, 1993.

Montoye H, Cunningham D, Welch H, Epstein F. Laboratory methods for assessing metabolic capacity in a large epidemiologic study. Ameri J Epidemio 1970;91:38-74.

Montoye HJ. Estimation of habitual physical activity by questionnaire and interview. Am J Clin Nutr 1971;24:1113-8.

Montoye HJ, Kemper HCG, Saris WHM, Washburn RA. Measureing Physical Activity and Energy Expenditure. Human Kinetics, Champaign IL, 1996.

NIOSH. Work practice guide for the design of manual handling tasks. NIOSH. 1981.

Norgan NG. Measurement and interpretation issues in laboratory and field studies of energy expenditure. Am J Hum Biol 1996;8:143-58.

Ola L, Christina W, Annika H. Validity of a self-administered questionnaire for assessing physical work loads in a general population. J Occup Environ Med 2002;44:724-35.

Pollock ML, Gaesser GA, Butcher JD, Despr JP, Dishman RK. Franklin BA, Garber CE. ACSM position stand on the recommended quantity and quality of exercise for developing and manintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. Med Sci Sports Exerc 1998;30:975-91.

Prentice AM, Coward WA, Whitehead RG. Measurement of Energy Expenditure by the Doubly-labelled Water Method. In: Nestle Foundation. Annual report. Lausanne, Switzerland, 1984. pp61-9.

Rennie KL, Hennings SJ, Mitchell J, Wareham NJ. Estimating energy expenditure by heart-rate monitoring without individual calibration. Med Sci Sports Exerc 2001;33(6):939-45.

Robinson S. Physiology of Muscular Exercise. In Medical physiology, 12th ed., vol. 1, Mount Castle, CV ed., Mosby, St. Louis, 1968. pp 520-52.

Saris WHM, Binkhorst RA. The use of pedometer and actometer in studying daily physical activity in man. Part I. Relaibility of pedometer and actometer. Eur J Appl Physiol 1977;37:219-28.

Saris WHM, Binkhorst RA. The use of pedometer and actometer in studying daily physical activity in man. Part II. Validity of pedometer and actometer measuring the daily physical activity. Eur J Appl Physiol 1977;37:229-35.

Schoeller DA, Webb P. Five-day comparison of the doubly labeled water method with respiratory gas exchange. Am J Clin Nutr 1984;40:153-8.

Schultz S, Westerterp KR, Bruck K. Comparison of energy expenditure by the doubly labeled water technique with energy intake, heart rate, and activity recording in man. Amer J Clin Nutri. 1989;49:1146-54.

SjØgarrd K, Fallentin N, Nielsen J. Workload during floor cleaning. The effect of cleaning methods and work technique. Eur J Appl Physiol 1996;73:73-8.

Spady DW. Total daily energy expenditure of healthy, free ranging school children. Am J Clin Nutr 1980;33:766-75.

Spurr GB, Murgatroyd PR, Goldberg GR, Reina JC, Christman NT. Energy expenditure from minute-by-minute heart-rate recording: comparison with indirect calorimetry. Am J Clin Nutr 1988;48:552-9.

Spurr GB, Reina JC, Barac-Nieto M. Marginal malnutrition in school-aged Colombian boys: metabolic rate and estimated daily energy expenditure. Am J Clin Nutr 1986;44:113-26.

Strath SJ, Swartz AM, Bassett DR Jr, O'Brien WL, King GA, Ainsworth BE. Evaluation of heart rate as a method for assessing moderate intensity physical activity. Med Sci Sports Exerc 2000;32:s465-70.

Swain DP, Leutholtz BC. Heart rate reserve is equvalent to VO2 reserve, not to $\%VO_{2max}$. Med Sci Sports Exerc 1997;29:837-43.

Walt WH Van Der, Wyndham CH. An equation for prediction of energy expenditure of walking and running. J Appl Physiol 1973;34:559.

Winkel J, Westgaard R. Occupational and individual risk factors for shoulder-neck complaints. Part II. The scientific basis for the guide. Int J Ind Ergon 1992;10:85-104.

Wu HC, Wang MJ. Relationship between maximum acceptable work time and physical workload. Ergonomics 2002;45:280-9.