

에너지 대사량을 고려한 인력물자취급시의 생리적 안전 작업하중 모델 개발

김 홍 기

경기대학교 첨단산업공학부 산업공학 전공

Development of a Model for Physiological Safe Work Load from a Model of Metabolic Energy for Manual Materials Handling Tasks

Hong-Ki Kim

Major of Industrial Engineering Division of Advanced Industrial Engineering

The objective of this study was to develop a model for safe work load based on a physiological model of metabolic energy of manual material handling tasks. Fifteen male subjects voluntarily participated in this study. Lifting activities with four different weights, 0, 8, 16, 24kg, and four different working frequencies (2, 5, 8, 11 lifts/min) for a lifting range from floor to the knuckle height of 76cm were considered. Oxygen consumption rates and heart rates were measured during the performance of sixteen different lifting activities. Simplified predictive equations for estimating the oxygen consumption rate and the heart rate were developed. The oxygen consumption rate and the heart rate could be expressed as a function of task variables; frequency and the weight of the load, and a personal variable, body weight, and their interactions. The coefficients of determination (r^2) of the model were 0.9777 and 0.9784, respectively, for the oxygen consumption rate and the heart rate. The model of oxygen consumption rate was modified to estimate the work load for the given oxygen consumption rate. The overall absolute percent errors of the validation of this equation for work load with the original data set was 39.03%. The overall absolute percent errors were much larger than this for the two models based on the US population.

The models for the oxygen consumption rate and for the work load developed in this study work better than the two models based on the US population. However, without considering the biomechanical approach, the developed model for the work load and the two US models are not recommended to estimate the work loads for low frequent lifting activities.

Keywords : Oxygen consumption, Heart rate, Safe work load, Metabolic energy, MMH

1. 서 론

산업사회의 발달에 따라 많은 분야에서 자동화가 이루어져 왔지만, 모든 산업 현장에서 완전 자동화는 어려운 실정이다. 그러므로 여전히 인력으로 수행해야만 하는 작업들이 많은 것이 산업현장의 현실이다. 특히 자동

화 시설을 많이 갖추기 힘든 중소 기업체의 경우는 인력에 의존하지 않을 수 없는 실정이다. 이로 인한 근로자에 대한 재해 발생 빈도는 증가 추세에 있는 경향이 있다. 근골격계 질환(Musculoskeletal Disorders, MSD)에 관련된 많은 직업병 등이 발생하고 있다. 근골격계 질환의 대표적인 병으로는 요통과, 손목관 증후군(Carpal Tunnel

Syndrome, CTS)같은 누적 외상병(Cumulative Trauma Disorders, CTD)을 들 수 있다.

Caillet (1981)은 전체 미국인들 중 7천만 명이 척추손상으로 고통을 받고 있으며 이 숫자는 매년 7백만 명씩 증가하고 있는 추세라 한다. 이들 중 5백만 명은 부분적으로 장애인이 되어가고 있으며 2백만 명은 직장을 그만 두어야 할 지경에 이르고 있다고 예측했다. 최근의 통계자료를 살펴보면 척추 손상 (Back Injury), 특히 요추 부위 (Lower Back)의 손상은 세계적으로 나날이 증가하는 추세에 있다. 요통 (Lower Back Pain, LBP)으로 인한 작업일수의 손실은 매년 1억7천 일로서 이에 따른 손실은 가히 천문학적인 숫자에 이르고 있다. 1990년에는 100 - 500억 달러로 조사되었으며 계속 증가될 것으로 전망되었다 (김청송, 1991, Frymoyer, 1997). 유럽국가의 전국적인 통계에서도 질병으로 인한 결근의 10-15%는 요통으로 인한 것이며, 이에 따른 근로자당 작업손실 일수는 급증하고 있는 추세로 보고되고 있다.

이러한 직업성 요통과 인력물자취급(Manual Materials Handling Tasks, MMH)은 매우 높은 관련이 있다. 인력물자취급이란 어떤 물체를 기계의 도움 없이 인력에 의하여 들거나 내리거나 밀거나 당기거나 또는 운반에 의하여 한 장소에서 다른 장소로 이동시키는 작업을 말한다.

1981년 미국 국립 직업안전보건원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 보고에 의하면 인력물자취급이 미국 내 전체 작업 중 1/3인 것으로 추정되었다 (NIOSH, 1981, Garg, 1983).

미국 국립 안전 위원회(National Safety Council, NSC)에 따르면 인력물자취급으로 인한 재해가 모든 산업 재해의 27%에 해당한다고 하였으며, 직업성 요통은 모든 직업관련 부상의 약 30-40%를 차지하며 건당 평균 의료 보상은 6만 달러에 달한다 (NSC, 1979, 1993). Klein 등(1984)은 요통의 25-28%가 인력물자취급에 기인하였다고 발표하였다. 이러한 직업성 요통으로 인하여 약 1억 일의 작업시간이 손실되고, 약 400억 달러의 직접, 간접 비용이 발생된다고 한다 (Mital 등, 1997).

우리 나라의 경우 1992년~1994년 사이에 발생한 산업재해를 살펴보면, 광업과 운수, 창고 등에서 발생한 재해는 9.36%정도가 발생한 것으로 나타났다. 하지만 건설업의 경우 전체가 인력물자취급에 대한 재해라고 볼 수 없지만 27.21%정도의 재해가 발생한 것을 포함하면, 약 30%정도가 아직도 인력물자취급에 의해서 발생하고 있는 것으로 나타났다(정병용, 1996).

이러한 직업성 요통의 발생 건수를 감소시켜 보려는 노력의 일환으로 인간공학 분야에서는 인력물자취급에 관한 많은 연구를 수행해 오고 있다. 인력물자취급에서 작업자가 자신을 가장 잘 보호할 수 있는 방법은 자신의 한계를 알고, 그 범위 내에서 일하는 것이라고 많은

연구자들이 말하고 있다. 그러므로 인력물자취급시의 (특히 들어올리는 작업)의 안전과 건강을 위한 지표를 만들기 위해서는 인간의 능력 한계점이 정확하게 수립 되어야만 한다.

인력물자취급시 신체에 미치는 스트레스의 대부분은 다음 세 가지 범주에 든다고 할 수 있다.

- (1) 근골격계에 가해지는 생체 역학적 스트레스,
- (2) 심장과 호흡기 계통에 가해지는 생리적 스트레스,
- (3) 인간 자신이 힘 또는 능력의 발휘를 자각함으로써 자신에게 미치는 심리적인 스트레스.

개인의 들어올리는 능력은 여러 개의 변수로 이루어진 함수로서, 생리학적 최대 에너지 소모능력, 요추 부분이 최대 이겨낼 수 있는 생체역학적 최대 압축 스트레스, 그리고 인체심리학적 최대 허용능력 등에 의해 제한을 받고 있다. 주어진 작업조건하에서 인간은 자신의 관점에 근거하여 자기 자신이 기꺼이 받아들일 수 있는 무게 이상을 들지 않도록 한다는 것이 일반적인 인간공학적 지침이다.

2. 연구목적 및 연구범위

인력물자취급의 안전 작업하중을 제안해 보려는 많은 연구 노력이 행해져 오고 있다. 안전 작업하중을 위한 인간공학적 논리를 적용하는데 있어서 대부분의 어려움은 다양한 작업환경, 작업조건, 작업자의 특성에 따른 허용한계에 대한 기준을 정의하기가 어렵다는 것이다. 더욱이 그 기준 항목들이 서론에서 언급한 세 가지 부류의 스트레스에 따라 각각 다른 물리적 단위이기 때문에 작업의 안전하중을 설정한다는 것에 어려움이 있다.

본 연구의 목적은 들기 작업에 대한 생리학적 작업부하를 추정하기 위하여 생리학적 반응들, 즉 에너지 대사량 또는 산소 소모량 그리고 심박수등을 하나의 척도로 고려할 경우 복잡하고도 고가의 장비를 사용하지 않고 에너지 대사량 또는 산소 소모량을 작업 조건에 따라 추정할 수 있는 예측 모델을 개발하고, 이 모델들로부터 들기 작업에 대한 작업 하중을 추정하고자 하는 것이다. 또한 외국의 예측 모델들과의 비교 분석을 통하여 좀 더 나은 한국인에게 적절한 모델을 개발하고자 한다.

인력물자취급의 작업에 대한 네 가지의 인간공학학적 접근 방법 중 (역학적, 생체역학적, 생리학적, 인체심리학적 접근방법) 생리학적인 접근방법과 이에 따른 생리적 항목들 중 산소소모량과 심박수를 고려해 보는 것이 본 연구의 연구 범위라 할 수 있다. 또한 인력물자취급의 작업 중 가장 작업 부하가 크다고 할 수 있는 들기 작업을 고려하였으며 드는 작업 높이는 일반 산업 현장

에서 많이 수행되는 높이라고 할 수 있는 바닥에서 76cm 높이를 고려하였다. 생리학적 접근방법에 대한 좀 더 상세한 내용은 다음에서 서술하겠다.

2.1 생리학적 접근방법 (Physiological Approach)

생리학적 접근방법은 신체에 주는 생리적 스트레스에 관심을 둔 것이다. 이 접근방법은 에너지소모량과 에너지소모 상한치 같은 생리학적 기준을 선택하여 이 에너지소모 상한치에 근거하여 들어올리기 작업의 능력을 추정할 수 있다.

작업생리학은 작업을 수행하는 동안 생리적 변화가 신체 내에서 발생한다는 사실에 입각하여, 역으로 생리적 변화 요소의 측정치를 알게 되면 작업자에게 부과되는 스트레스 수준을 알 수 있다는 논리를 따른다. 작업 방법, 수행수준, 환경요소들도 스트레스수준에 반영되고 평가되어 질 수 있을 것이다.

생리학적 접근방법의 목표는 신진대사와 심장혈관 기준을 이용한 한계점을 구하고, 선택된 기준한계점을 기초로 들어올리기 작업 능력을 결정하는 것이다. 개인의 반복적 들어올리기 작업에 대한 기준으로 산소소모량, 신진대사 에너지소모량, 또는 심박수를 채택할 수 있다.

들기 작업에 의해 요구되는 에너지소모량 평가를 위해 일반적으로 산소소모량을 측정한다. 산소소모량 1.0 l는 약 5 Kcal 에너지소모량에 해당한다. 근육이 활동할 때, 근육의 증가된 신진대사는 더 많은 산소를 필요로 하고, 근육의 지속적인 활동을 위해 에너지를 요구한다. 이러한 환경을 위해 호흡기능은 증가되고, 더 많은 혈액이 근육으로 흘러야 한다. 그러므로 이러한 호흡과 심장혈관 반응은 근육에 의해 소모되는 산소소모량과 선형관계에 있다고 할 수 있다. 결론적으로 산소소모량은 근육에 의한 외부적 작업량과 선형관계에 있다(NIOSH, 1981).

생리학적 요구의 측정치는 들어올리기 작업에 필요한 능력의 백분율을 결정하기 위해서 생리적 작업능력(Physical Work Capacity)과 연관지을 수 있다. 생리적 작업능력은 작업 부하를 증가시켜 가면 산소소모량은 선형적으로 증가하게 되며 일정한 수준에 도달하게 되는데, 이때 작업 부하를 더 증가시킨다 하더라도 더 이상의 산소소모량의 증가가 없게 된다. 이때의 한계적 산소소모량을 최대 산소섭취능력(Maximal Oxygen Uptake)이라 하며 이 측정치를 생리적 작업능력으로 간주한다. 최대 산소섭취능력의 상세한 측정 방법은 Astrand and Rodahl(1986)과 박지수 등(1996)에서 찾아볼 수 있다. 미국의 NIOSH(1981)는 미국인의 40세 남성과 여성의 평균 PWC를 각각 3.0 / O₂/min, 2.1 / O₂/min 로 주장하고 있다. Kim(1990)은 미국인 23.5세 남성의 PWC를 3.5 / O₂/min라고 하였으며 박지수 등(1996)은 한국인 20.5세

남성의 PWC를 2.5 / O₂/min로 주장하였다.

생리학적 기준에 기초하면, 하루 8시간의 작업에 있어서 개인은 자신의 생리적 작업능력의 33%를 초과하지 말아야 한다. 미국의 젊은 남자의 경우는 하루 8시간의 작업시 평균신진대사 에너지소모율은 개인의 최대에너지 소모율의 33% (5 Kcal/min, 즉 산소소모량 1.0 l/min 에 해당)를 초과하지 않아야 한다. 그리고 심장박동 수는 110 내지 115 beats/min을 초과하지 않아야 한다 (Snook and Irvine, 1967).

작업 조건에 따른 생리학적 에너지 소모량에 대한 모델이 많이 개발되어 왔으나 이러한 외국의 모델에 한국인의 경우를 적용시킬 수 있는지의 여부는 아직까지 확인되고 있지 않다. 외국의 모델로는 Frederick(1959), Garg(1978), Kim(1990)의 모델들이 있다. 그러나 국내에서는 지금까지 발표된 모델이 거의 없다.

김홍기(1997)에 의하면 NIOSH의 RWL, AL, MPL에 해당하는 중량을 4가지 들기 작업 빈도에 따라 들어올리는 작업에 따라 측정된 산소 소모량과 Garg(1978) 및 Kim(1990)의 모델에 의한 예측 산소 소모량을 비교한 결과, 실제 측정치가 모델에 의한 예측치 보다 13.26-40.11% 높게 나타났다고 주장하였다. Asfour(1980)는 Garg의 모델이 실제측정치 보다 높게 예측되는 경향이 있다고 하였다. 이러한 사실로 미루어 볼 때 Garg와 Kim 그리고 다른 외국의 산소 소모량 모델들을 우리 나라 사람들에게 적용시키는데 문제점이 있을 수 있다고 본다.

3. 실험장비 및 실험방법

본 연구에서 실험을 위한 작업환경은 실내 온도를 23±3℃로 하였으며, 피실험자는 운동복과 편안한 운동화를 사용하고, 편편한 바닥, 장애물이 없고 마찰력이 좋은 바닥의 작업환경 조건을 유지하였다. 들기 작업 자세는 자유형으로 하였고, 들어올리는 범위는 바닥에서 76cm까지로 하였다.

3.1 피실험자

대학생 15명을 대상으로 하였다. 이들의 신체 특성치는 표 1과 같다. 현재 요통이 있거나 과거에 요통 경력이 있는 학생은 제외하였다. 피실험자는 들기 작업과 실

<표 1> 피실험자의 신체 특성치

	연령(세)	신장(cm)	체중(Kg)
평균	23.4	172.9	70.3
표준편차	1.96	5.38	10.80

험장비의 착용에 익숙해지기 위하여 1주일간의 적응 훈련기간을 가졌다.

3.2 실험 장비

3.2.1 산소소모량 측정기 (O₂ Consumption Measurement Device, Metabolic Measurement Cart)

Sensormedics 사의 MMC-2900 model 을 이용하여 피실험자의 들기 작업에 따른 산소소모량을 측정한다.

3.2.2 심박계 (Heart Rate Monitor)

상기한 작업 형태에 따라 산소소모량 측정시 매 분당 심박수를 함께 측정한다. 사용할 기구는 Polar-77054로서, 실험이 진행되는 동안 심박수를 매 15 초 내지는 30 초 간격으로 측정하여 저장할 수 있다.

3.2.3 들기 작업 상자

들어올리기 작업 상자는 일반적으로 많이 사용되는 크기의 상자 한가지만을 선정하였다. 그 재원은 45.72cm (너비) X 30.48cm (길이) X 30.48cm (높이) 이다.

3.2.4 들기 작업 작업대

작업대의 높이는 바닥으로부터 76cm 높이를 선정한다. 작업대의 크기는 150cm (너비) X 80cm (길이) X 76cm (높이)의 작업대를 사용한다. 실제로 피실험자가 들어올리는 높이는 작업상자의 손잡이 위치로부터 시작하여 들어올린 후의 손잡이 위치이므로 15cm에서 91cm의 들기 높이로 볼 수 있다.

3.2.5 인체 제원 측정기 (Anthropometric Measurement Device)

신체의 각 부위를 측정하기 위하여 GPM 인체측정기를 사용하였으며 본 실험에서는 신장과 체중만의 측정치가 필요하였으나 추후 연구를 위하여 여러 가지 다른 항목들도 측정하였다.

3.3 실험방법 및 절차

들기 작업의 빈도와 작업 중량의 조합에 의하여 설정된 작업 부하에 따른 산소소모량과 심박수를 측정하였다. 네 가지 다른 작업 중량 0, 8, 16, 24kg을 네 수준의 작업 빈도 2, 5, 8, 11회/분에 따라 작업할 때 이에 대한 산소소모량과 심박수를 측정하였다. 측정치들은 5분의 마지막 1분의 시점에서 측정된 값들을 선택 내지는 평균값을 택하였다. 작업 부하 변화간의 시간은 5분 간격으로서 인체의 생리적 반응을 측정하기에 충분한 시간이다.

3.3.1 실험계획법(Design of Experiments)

연속 반복 측정이 있는 변형된 Split-Plot 실험계획으로 15명의 피실험자를 대상으로 다양한 작업부하에 따른 실험을 통하여 심박수 및 산소소모량을 측정하였다. 이를 위한 실험계획법의 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Y_{ijk} = \mu + F_i + L_j + FL_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Y_{ijk} = 들기 작업 빈도 F_i 와 작업중량 L_j 에 대한 피실험자 S_k 의 측정된 분당 산소소모량 (ml/min)

μ = 모든 실험에 대한 공통효과

F_i = 들기 작업 빈도 ($i = 1, 2, 3, 4$)

L_j = 작업하중 ($j = 1, 2, 3, 4$)

FL_{ij} = 들기 작업 빈도와 작업하중의 교호작용 효과

S_k = 피실험자 ($k = 1, 2, 3, \dots, 11$)

ϵ_{ijk} = error term

4. 실험결과 및 분석

피실험자 11명의 데이터는 산소소모량 모델을 개발하는데 사용하였고 4명의 데이터는 모델 검증에 사용하였다.

<표 2> 산소소모량에 대한 분산분석표

요 인	자유도	제곱합	평균제곱	F 비	유의 확률
FREQ	3	21,524,433.61	7,174,811.20	75.53	<.0001
LOAD	3	11,089,624.56	3,696,541.52	38.91	<.0001
SN(FREQ)	40	3,799,844.59	94,996.11	13.54	<.0001
FREQ*LOAD	9	2,895,687.46	321,743.05	45.87	<.0001
SN(FREQ*LOAD)	120	841,737.23	7,014.48	.	.
Corrected Total	175	40,151,327.45			

<표 3> 심박수에 대한 분산분석표

요 인	자유도	제곱합	평균제곱	F 비	유의 확률
FREQ	3	31,848.74	10,616.25	20.16	<.0001
LOAD	3	23,586.20	7,862.07	14.93	<.0001
SN(FREQ)	40	21,061.00	526.53	42.18	<.0001
FREQ*LOAD	9	5,498.46	610.94	48.94	<.0001
SN(FREQ*LOAD)	120	1,498.09	12.48	.	.
Corrected Total	175	83,492.49			

피실험자의 들기 작업 빈도와 작업 중량 그리고 이들의 교호작용은 모두 다 산소소모량과 심박수에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다(표 2, 3).

ANOVA분석에 의하여 산소소모량과 심박수에 유의한 영향을 끼치는 작업 변수들, 즉 작업빈도, 작업중량과 피실험자들의 체중, 그리고 이들간의 여러 가지 교호작용 인자들을 함께 고려하여 Stepwise 방법에 의하여 변수들을 선택하고 이에 따른 회귀분석을 실시하였다. 산소소모량과 심박수를 예측하기 위한 모델의 변수로서 체중, 작업빈도*체중, 작업하중, 작업빈도*작업하중의 변수들이 선택되었다. 이 들 회귀분석에 의한 모델들과 그에 따른 결정계수는 <표 4>와 같다.

<표 4> 회귀분석 의한 산소소모량과 심박수 모델

회 귀 식	r ²
VO2 = 4.16270*B + 0.82768*F*B + 4.16270*L + 3.96975*F*L	0.9777
HR = 1.01638*B + 0.04105*F*B + 1.01638*L + 0.10422*F*L	0.9784
VO2 = 산소소모량 (O2 ml/min) HR = 심박수 (beats/min) B = 체중 (kg) L = 작업하중 (kg) F = 작업 빈도 (들기 횟수/min)	

이 모델들을 검증하기 위하여 모델 개발에 사용하지 않은 피실험자 4명의 데이터를 이용하였다. 산소소모량 모델은 전반적인 절대 퍼센트 에러(Absolute percent error)가 12.83% 이었으며, 2, 5, 8, 11회 들기 작업에 대해서는 10.92% - 14.63%를 나타냈으며 각 들기 작업 빈도에 따른 작업 중량 0, 8, 16, 24Kg에 대해서는 8.05% - 23.99%의 절대 퍼센트 에러를 보였다. 그러나 가장 퍼센트 에러가 높은 작업 중량 0Kg을 배제하면 절대 퍼센트 에러는 최소 8.05%에서 최대 15.06% 이었다. 개발된 산소 소모량 모델을 미국인에 대한 모델들(Kim(1990), Garg(1978))과 비교한 결과 전반적으로 절대 퍼센트 에러는 Kim(1990)의 경우 12.26%, Garg(1978)의 경우 18.55% 이었다. Kim(1990)의 산소소모량 모델은 식 (1)과 같고 본 실험의 작업 조건을 고려하여 조정한 Garg(1978)의 산소소모량 모델은 식 (2)와 같으며 사용된 변수에 대한 설명은 표 4의 변수들과 동일하다.

$$VO2 = 5.48140*B + 0.56020*F*B + 2.76780*L + 3.40980*F*L \dots\dots\dots (1)$$

$$VO2 = 4.80000*B + 0.52650*F*B + 3.30708*F*L \dots\dots\dots (2)$$

심박수 모델은 전반적인 절대 퍼센트 에러가 14.95% 이었으며, 2, 5, 8, 11회 들기 작업에 대해서는 각 각 13.34% - 17.06%를 나타냈으며 각 들기 작업 빈도에 따른 작업 중량 0, 8, 16, 24Kg에 대해서는 최소 10.21%에서 최대 21.51%의 절대 퍼센트 에러를 보였다. 보다 상세한 비교 결과는 표 5와 같다.

이들 모델들을 바닥에서 76cm 높이로 드는 작업에 대한 NIOSH의 RWL, AL, MPL에 해당하는 중량을 4가지 들기 작업 빈도 (2, 5, 8, 11회/분)에 따라 들어올리는 작업(김홍기, 1997)과 비교한 결과 절대 퍼센트 에러가 산소소모량 모델은 12.17%, 심박수 모델은 12.80%로서 본 실험 데이터에 의한 검증 결과와 유사한 경향을 보였다.

본 실험에 의한 모델의 경우 Garg(1978)의 모델보다는 나은 결과를 예측하지만 Kim(1990)의 모델과는 크게 차이가 나지는 않았다. 특히 작업 중량이 0Kg일 경우 절대 퍼센트 에러가 9.49% - 23.99%로서 큰 오차를 보이고 있기 때문에 이 경우를 제외하면 절대 퍼센트 에러는 다소 감소 될 수 있을 것이다. 이것은 피실험자들의 자유로운 작업자세에 따른 산소소모량의 분산이 큰 이유가 한 원인이 될 수도 있을 것이다.

<표 5> 산소소모량과 심박수 모델의 검증 결과

모델 종류 변수 분류	Absolute % Error (%)			
	VO2			HR
	본 실험 Model	Kim(1990) Model	Garg(1978) Model	본 실험 Model
Overall	12.83	12.26	18.55	14.95
Freq-2	12.61	9.71	19.40	17.06
Load- 0	14.01	9.17	13.80	14.81
Load- 8	12.70	6.25	19.30	14.99
Load-16	11.78	10.79	23.46	16.95
Load-24	11.95	12.65	21.04	21.51
Freq-5	13.18	12.50	16.67	14.62
Load- 0	12.33	12.19	12.37	12.73
Load- 8	15.06	14.41	17.35	15.05
Load-16	14.59	13.59	17.64	14.11
Load-24	10.74	9.80	19.33	16.57
Freq-8	10.92	13.14	20.33	14.80
Load- 0	9.49	7.29	14.39	19.48
Load- 8	9.14	11.68	19.52	14.51
Load-16	10.95	15.23	21.30	14.73
Load-24	14.11	18.36	26.13	10.48
Freq-11	14.63	13.69	17.80	13.34
Load- 0	23.99	19.05	17.47	16.01
Load- 8	14.17	12.77	16.20	12.70
Load-16	12.32	9.35	15.85	14.42
Load-24	8.05	13.57	21.66	10.21

산소소모량 모델로부터 주어진 산소소모량에 대한 작업 중량은 다음 식 (3)로부터 추정되어 질 수 있다.

$$LOAD = \frac{VO_2 - B*(4.16270 + 0.82768 * F)}{(4.16270 + 3.96975 * F)} \dots (3)$$

이 모델을 피실험자 15인의 모든 산소소모량 데이터에 적용하여 역으로 작업 중량을 계산하여 본 결과 전반적으로 절대 퍼센트 에러가 39.03% 이었으며, 2, 5, 8, 11회 들기 작업에 대해서는 각각 29.13% - 61.18% 이었으며 각 작업 빈도에 따른 작업 중량 8, 16, 24Kg에 대해서는 19.03% - 94.19%로서 매우 큰 오차 범위를 이루었다. 작업 중량이 0Kg인 경우는 절대 퍼센트 에러를 계산할 수 없다. 이러한 큰 절대 퍼센트 에러는 들기 작업 빈도가 분당 2회와 같은 매우 낮은 빈도의 작업에 대해서 산소 소모량의 측정치로부터 작업 하중을 추정하기에는 다소 무리가 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

<표 6> 작업 하중 추정식에 대한 검증 결과

모델 종류 변수 분류	Absolute % Error (%)		
	본 실험 Model	Kim(1990) Model	Garg(1978) Model
Overall	39.03	51.60	93.72
Freq-2	61.18	70.51	145.44
Load- 8	94.19	98.58	218.55
Load-16	49.44	62.31	125.14
Load-24	39.93	50.64	92.63
Freq-5	33.27	46.38	84.73
Load- 8	49.26	65.85	117.00
Load-16	30.20	41.70	75.26
Load-24	20.35	31.60	61.91
Freq-8	32.53	47.66	76.69
Load- 8	49.60	67.79	104.89
Load-16	26.29	40.19	65.00
Load-24	21.71	35.00	60.19
Freq-11	29.13	41.86	68.01
Load- 8	43.38	61.14	93.69
Load-16	24.98	30.56	54.17
Load-24	19.03	33.87	56.16

Kim(1990), Garg(1978)의 미국인에 대한 모델을 이용하여 검증한 결과 전반적으로 51.60%, 93.72%의 매우 높은 절대 퍼센트 에러를 보였다. 그러나 Kim(1990)은 미국인에 대한 작업 하중에 대한 모델의 절대 퍼센트 에러를 23.98%라고 하였다. 그러나 Kim(1990)의 작업 하중 모델을 본 연구의 실험 데이터에 적용해 본 결과 51.60%의 높은 절대 퍼센트 에러를 보여 주었다. 본 연구 결과의 작업 하중 모델과 Kim(1990)의 작업 하중 모델은 매우 유사한 모델이나 검증 결과에서는 이와 같은 큰 차이를 보이고 있는 것은 외국의 생리학적 모델들을 한국인에게 적용시키는데 문제점이 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 보다 상세한 비교 결과는 <표 6>과 같다.

5. 결 론

본 실험의 ANOVA분석 결과 산소소모량과 심박수에 유의한 영향을 미치는 변수로서 작업자의 체중, 작업 하중, 작업 빈도 모두 다 통계적으로 유의한 영향이 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 산소소모량 예측 모델은 회귀모델의 결정계수가 0.9777, 절대 퍼센트 에러가 12.83%로서 미국의 모델들 보다 좋은 결과를 보였다. 심박수 예측 모델은 약 15%의 절대 퍼센트 에러를 나타내었으나 산소소모량 예측 모델에 비하여 크게 나쁘지는 않은 모델이라 할 수 있다.

주어진 산소소모량에 대한 작업 하중을 계산하는 과정에서는 절대 퍼센트 에러가 39.03%로 높았으나, 미국의 모델들은 51.60%와 93.72%로서 훨씬 높았다. 물론 산소소모량 모델로부터 역으로 작업 하중을 구한다는 자체는 바람직하지 않으나 현재로서는 이 방법 외에 다른 대안이 없는 실정이다. 특히 들기 작업 빈도가 낮은 경우에는 본 연구에 의한 작업 하중 모델이나 미국의 두 작업 하중 모델들 모두 다 적합하지 않다고 본다. 그러므로 작업 빈도가 낮은 경우에는 생리학적 접근 방법에 의해서만 안전 작업 하중을 결정하는 것보다는 생체역학적 접근 방법을 동시에 고려하는 것이 바람직 할 것이다.

본 연구는 한정된 남자 대학생 그룹의 피실험자를 사용하였으므로 다양한 한국인 작업자들에 대한 산소소모량 모델을 구축하기 위해서는 추 후 대학생만이 아닌 다양한 피실험자와 성별, 나이에 대한 영향을 고려한 산소소모량 모델을 개발하여야 할 것이다. 그리고 작업 하중 없이 단순한 체중만의 움직임에 따른 들기 작업을 고려하여 체중과 작업 자세에 따른 산소소모량과 심박수에 관한 보다 상세한 자료의 확보와 이것을 이용한 모델의 변형도 필요할 것이다.

참고문헌

- [1] 김청송; 통증심리학, 중앙적성출판사, pp. 100-107, 1991.
- [2] 김홍기; “인력물자취급의 권장안전하중에 대한 생리학적 고찰”, 대한인간공학회지, 16(3), pp. 23-36, 1997.
- [3] 박지수, 김홍기, 최진영; “작업유형에 따른 생리학적 작업능력의 비교분석” 대한인간공학회지, 15(2), pp. 89-98, 1996.
- [4] 정병용; “연도(1972-1994)별 산업재해의 발생경향에 관한 연구” 대한인간공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 84-86, 1996.
- [5] 정성학, 김홍기; “인력물자취급시 작업빈도에 따른 생리적 작업능력의 연구”, 대한인간공학회지, 18(2), pp. 1-9, 1999.
- [6] Astrand, P. O., and Rodahl, K.; Textbook of Work Physiology, (1st ed., 2nd ed.), 3rd ed., p. 332, p. 379, New York: McGrawhill Inc., (1970), 1977.
- [7] Cailliet, R. ; Low Back Pain Syndrome, F.A. Francis Co., Philadelphia, 1981.
- [8] Frederick, W. S. ; “Human Energy in Manual Lifting”, Modern Materials Handling, 14(3): pp. 481-484, 1959.
- [9] Frymoyer., Durett CL: The economics of spinal disorder, The Adult Spine : Principles and Practice, Frymoyer JW, ed. Philadelphia, Lippincott-Raven, 1997, pp. 143-150.
- [10] Garg, A., “Lifting and Back Injuries: A Review of the Causes of this Industrial Health Problem, and the Major Methods Used to Combat It.”, Plant Engineering, Vol. 37, pp. 67-71, 1983.
- [11] Garg, A., Chaffin, D. B., and Herrin, G. D.; “Prediction of Metabolic Rates for Manual Materials Handling Jobs”, American Industrial Hygiene Association Journal, 39(8) : 661-674, 1978.
- [12] Khalil, T. M., Genaidy, A. M., Asfour, S. S. and Vinciguerra, T., “Physiological Limits in Lifting”, American Industrial Hygiene Association Journal, 46(4), pp.220-224, 1985.
- [13] Kim, H. K. ; “Development of a Model for Combined Ergonomic Approaches in Manual Materials Handling Tasks,” Ph.D. Dissertation, Texas Tech University, Lubbock, Texas, U.S.A., 1990.
- [14] Klein, B. P., Roger, M. A., Jensen, R. C., and Sanderson, L. M. ; “Assessment of worker's compensation claims for back sprain/strains,” Journal of Occupational Medicine, 26, pp. 443-448, 1984.
- [15] Mital, A. Nicholson, A. S., and Ayoub M. M.; A Guide to Manual Materials Handling, p. 3-4, 1997.
- [16] NIOSH Technical Report ; Work Practices Guide for Manual Lifting, U.S. Department of Health and Human Services, Cincinnati, Ohio, 1981.
- [17] National Safety Council; Accident Facts, 1979, 1993.
- [18] Snook, S. H., and Irvine, C. H. ; “Maximum Acceptable Weight of Lift,” American Industrial Hygiene Association Journal, 28(4), pp. 322-329, 1967.