Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol.16, No.3, 1997

인력물자취급의 권장안전하중에 대한 생리학적 고찰

Physiological Viewpoint of the Recommended Safe Weights of Load for Manual Materials Handling Tasks

김 홍 기*

ABSTRACT

The objective of this study was to make a comparison of the oxygen consumption rates during the lifting activities and the physiological criteria of the recommended weights of RWL, AL, and MPL by NIOSH Guideline. The Physical Work Capacity (PWC) based on the bicycle ergometer was 2562.71ml/min, and the one based on the treadmill was 2874.89ml/min for the college male students of Korea.

Lifting activities with four different lifting frequencies(2, 5, 8, 11 lifts/min) for one lifting range from floor to 76cm height were studied. The oxygen consumption rates and the heart rates were measured or recorded while subjects were lifting the weight of RWL, AL, and MPL. The heart rates and the oxygen consumption rates increased as the frequency increased from 2 to 8 lifts/min. However, those slightly decreased at the frequency of 11 lifts/min.

The measured oxygen consumption rates were ranging from 2.3% to 29.6% higher than the physiological criteria 620, 700, and 1000ml/min, respectively, of the RWL, AL, and MPL for all the lifting frequencies(5, 8, 11 lifts/min) except 2 lifts/min. It is suggested that the physiological criteria of NIOSH Guideline should be based on the Lifting PWC, which can consider the type of lifting activity and the frequency of the task, rather than using the PWC by ergometer or treadmill.

The measured oxygen consumption rates were ranging from 13.26% to 40.11% higher than the values estimated using the models by Garg and Kim. From these findings it is suggested that the NIOSH Equation should not be directly applied to Korean without reasonable modifications.

* 경기대학교 산업공학과

** 본 연구는 1995년도 경기대학교 교내연구지원비에 의하여 수행되었음.

1. 서 론

1.1. 인력물자취급에 대한 연구 배경

인력물자취급(Manual Materials Handling Tasks, MMH) 이란 어떤 물체를 기계의 도움 없이 인력에 의하여 들어올리거나 내리거나 밀거나 당기거나 또는 운반에 의하여 한 장소에서 다른 장소로 이동시키는 작업을 말한다. 인력물자취급은 여러 가지 다른 작업환경 하에서 상존 하는데 예를 들면 작업대에다 반복적으로 들어올리는 작업, 무거운 지렛대를 미는 작업, 전선이 감겨있는 바퀴(spool)를 이동하는 작업, 간호원이 침대에 눕혀진 환자를 들어올리는 작업 등등이 이 범주에 속한다. 이러한 형태의 인력물자취급은 매우 비효율적이고도 위험한 작업이므로 이에 따른 작업자의 에너지 손실뿐만 아니라 위험에 따른 여러 가지 사고들과 재해로부터 야기되는 손실은 인간적 그리고 경제적인 측면에서 볼 때 엄청날 것이다.

산업혁명 이후 계속적으로 발전되어온 기계화 내지는 자동화 추세에 힘입어 작업성격이 조직적이거나 반복적인 성격을 가진 소품종 대량생산체제의 산업현장에서는 많은 인력물자취급이 산업용 로보트로 대치되어 가고 있으나, 아직도 산업현장 곳곳에서는 한정된 작업공간과 비반복성 때문에 인력물자취급이 완전히 없어질 수가 없는 실정이다. 미국 내에서는 육체적 노력을 요하는 인력물자취급 작업이 전체 작업 중 1/3인 것으로 추정되었다 (Garg, 1983). 이러한 인력물자취급이 부적절하게 설계되는 경우 작업자는 상해를 입을 수 있는바, 미국의 통계를 보면 인력물자취급으로 인한 근골격계(Musculoskeletal System)의 부상을 입는 재해가 전체 작업 관련 재해의 52%에 달하며, 이에 따라 매년 5백만 명의 작업자가 노동력을 상실하고, 연간 약 1,000억 달러의 비용을 초래하고 있다고 보고하였다. 우리 나라의 경우 1972년~1994년 사이에 발생한 산업재해를 살펴보면, 광업과 운수, 창고 등에서 발생한 재해는 6.9%정도가 발생한 것으로 나타났다. 하지만 건설업의 경우 전체가 인력물자취급에 대한 재해라고 볼 수 없지만 21.9%정도의 재해가 발생한 것을 고려하면, 약 30%정도가 아직도 인력물자취급에 의해서 발생하고 있는 것으로 나타났다고 할 수 있다(정병용, 1996).

최근의 통계자료를 살펴보면 인력물자취급으로 인한 상해 중 가장 비율이 높은 것은 척추 손상(back injury), 특히 요추부위(lower back)의 손상으로서 세계적으로 나날이 증가하는 추세에 있다. Cailliet은 전체 미국인들 중 7천만 명이 척추손상으로 고통을 받고 있으며 이 숫자는 매년 7백만 명씩 증가하고 있는 추세라 한다(Cailliet, 1981). 이들 중 5백만 명은 부분적으로 장애인이 되어가고 있으며 2백만 명은 직장을 그만 두어야 할 지경에 이르고 있다 한다(Khalil, 1991 ; Stephens, 1991). 또한 미국의 Liberty Mutual Insurance Company는 1989년 한 해에 만도 요통에 따른 산재보험 지불신청건 수가 약 33%를 차지하고 있으며, 그에 따른 산재비용도 991억 달러나 되었다고 한다. 만약 손실임금, 생산성 감소에 따른 비용손실, 작업일수의 손실, 그리고 재교육 비용 등의 간접손실 비용까지 고려한다면 이에 따른 손실은 가히 천문학적인 숫자에 이른다고 할 수 있다 (Webster, and Snook, 1994). Klein 등은 이러한 요통의 25~28%가 인력물자취급에 기인하였다고 발표하였다(Klein, Roger, Jensen, and Sanderson, 1994).

지난 40여 년간에 걸쳐, 인력물자취급은 인간공학, 작업생리학, 생체역학, 심리학, 물리치료학, 재활의학, 정형외과학등의 많은 분야와 전문가들로부터 관심의 대상이 되어 왔다. 이러한 관심의 주원인은 위에서 언급한 바와 같이 인력운반작업에 연

유된 많은 산업재해들의 격심함에 의해 고통받는 작업자들 그리고 엄청난 의료비 내지는 보상비 때문이다. 그러므로 이러한 요통에 의한 산업재해의 방지와 제어는 앞으로도 계속적으로 학계의 많은 연구자들과 기업들에 의해 광범위하게 고려되어져야만 할 것이다.

주어진 작업조건하에서 인간은 자신의 관점에 근거하여 자기 자신이 기꺼이 받아들인 무게 이상을 들도록 하면 안된다는 것이 일반적인 상식이다. 개개인의 들어올리는 능력은 여러 개의 변수로 이루어진 함수로서, 신진대사의 에너지 소모량과 요추 부분이 스트레스를 이겨 나가는 능력에 의해 제한을 받고 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) 안전과 건강을 위한 지표를 만들기 위해서는 인간의 인내력과 능력 한계점이 정확하게 수립되어야만 한다. 이러한 논리를 적용하는데 있어서 대부분의 어려움은 다양한 작업환경, 작업조건, 작업자의 특성에 따른 허용한계에 대한 기준을 정의하기가 어렵다는 것이다.

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

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

인간공학 분야에서는 이러한 스트레스의 범주에 따라 인간이 운반 가능한 (특히 들어올리는 작업) 허용중량 내지는 안전중량을 결정하기 위해 다음과 같은 네 가지 접근방법을 사용하여 오고 있다.

(1) 역학적 접근방법(Epidemiological Approach)은 안전중량을 결정하기 위한 기준으로서 분포집단의 재해통계를 통하여 인력물자취급과 관련되어 발생하는 근골격계 상해(척추 손상, 요통, 근육파열, 누적외상병 등)의 발생빈도와 위험도를 이용한다.
(2) 생체역학적 접근방법(Biomechanical Approach)은 주어진 작업조건하에서 들어올릴 수 있는 안전중량을 결정하기 위한 기준으로서 척추에 가해지는 압축력과 같은 신체내의 힘의 부하를 사용한다.
(3) 생리학적 접근방법(Physiological Approach)은 주어진 작업조건하에서 들어올릴 수 있는 안전중량을 결정하기 위한 기준으로서 신체의 에너지 소모량을 사용한다.
(4) 인체심리학적 접근방법(Psychophysical Approach)은 피실험자들이 주어진 작업조건하에서 자신들의 능력에 알맞게 들어올릴 수 있는 최대중량을 결정하는데 시행착오의 실험을 통하여 그들 자신의 힘 또는 능력의 발휘를 자각하는 방법을 이용한다.

주어진 작업조건에는 단위시간당의 작업 횟수, 작업물체의 크기, 운반거리(시점과 종점으로 구분되어짐), 작업물체의 손잡이 유무상태, 그리고 작업이 몸통의 회전이 필요한지 아닌지 등이 있다.

이러한 네 가지 접근방법을 모두 다 고려하여야 하겠지만 본 연구에서는 우선 생리학적 접근방법(physiological approach)만을 택하였다. 그 세부적인 내용은 1.2 절에서 상세히 설명하겠다.

1.2 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 변

화가 신체 내에서 발생한다는 사실에 입각하여, 역으로 생리적 변화 요소의 측정치를 알게 되면 작업자에게 부과되는 스트레스 수준을 알 수 있다는 논리를 따른다. 작업방법, 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.

일반적으로, 산소소모량은 들어올리기 작업에 의해 요구되는 에너지소모량 평가를 위해 측정된다. 근육이 활동할 때, 근육의 증가된 신진대사는 더 많은 산소를 필요로 하고, 근육의 계속적인 활동을 위해 에너지원을 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 개인적 최대 에어로빅 능력과 연관지을 수 있다.

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

1.3 NIOSH 지침서

1981년 미국의 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 물건을 들어올리는 작업에 대한 안전기준을 제정한바 있다. 이 안전기준은 두개의 하한치, 상한치로 즉, Action Limit(AL)와 Maximum Permissible Limit(MPL)로 구성되어 있다. AL의 값은 "거의 모든 사람들"이 들어올릴 수 있는 중량이며, MPL은 단지 "아주 소수의 사람들"만이 들어올릴 수 있는 중량이다. AL값은 이상적 하중상수(Ideal Weight, IW)를 수평 요소(Horizontal Factor, HF), 수직 요소(Vertical Factor, VF), 이동거리 요소(Distance Factor, DF), 그리고 작업빈도수 요소(Frequency Factor, FF)들을 곱하여 보정 한 값이며, MPL값은 AL의 3배로 지정되어 있다(NIOSH, 1981). 이들 AL, MPL값이 현실화되지 않았다 하여 이 분야의 전문가들이 함께 모여 의견을 나눈 결과 1991년에 상기 요소들을 재조정하고, 비대칭성 요소(Assymmetry Factor, AF), 작업용기 요소(Container Factor, CF)들을 추가하면서 AL, MPL 개념을 없애고 RWL(Recommended Weight of Lift)을 새로이 제정하였다(Waters, Putz-Anderson, and Garg, 1994). 1981년도와 1991년도의 NIOSH Equation들의 각 요소들에 대한 비교는 표 1에 상세히 설명되어 있으며 이들 식은 다음의 식(1), (2), (3)과 같다.

$$AL = IW * HF * VF * DF * FF \quad (1)$$

$$MPL = 3 * AL \quad (2)$$

$$RWL = IW * HF * VF * DF * FF * AF * CF \quad (3)$$

생체역학적인 관점에서 볼 때 AL과 MPL 조건하에서는 요추부위의 L5/S1에 걸리는 최대압축력이 각각 3.43 kN과 6.37 kN을 초과하지 말아야 한다. RWL 조건하에서는 AL 조건과 마찬가지로

표 1. NIOSH Equation에 관련된 요소들

Factor	Multiplier	
	1981	1991
Load Constant(IW)	40 kg	23 kg
Horizontal(HF)	15/H	25/H
Vertical(VF)	1 - 0.004*|V-75|	1 - 0.003*|V-75|
Distance(DF)	0.7 + 7.5/D	0.82 + 4.5/D
Frequency(FF)	1 - F/Fmax	from table(1)
Asymmetry(AF)	not available	1 - 0.0032*A
Coupling(CF)	not available	from table(2)
Horizontal location(H)	W/2 + 15	W/2 + 25 (if V<25cm) W/2 + 20 (if V≥25cm)
Object Width(W)	Object width in sagittal(cm)	Object width in sagittal (cm)
Vertical location(V)	at origin of lift (cm)	at origin/destination of lift(cm)
Vertical travel distance(D)	Distance between origin and destination of lift (cm)	Distance between origin and destination of lift (cm)
Frequency (F)	Frequency of lift (lifts/min)	Frequency of lift (lifts/min)
Angle of Asymmetry (A)	not used	Location of the object to the worker's mid-sagittal plane(°)

Fmax : from table value (NIOSH, 1981)
Table(1) : from table value (Waters, Putz-Anderson, Garg, 1994)
Table(2) : from table value (Waters, Putz-Anderson, Garg, 1994)

3.43 kN을 초과하지 말아야 한다.

작업생리학적인 관점에서 볼 때 AL 과 MPL 조건하에서는 평균 신진대사 에너지 소모율이 각각 3.5 kcal/min(산소소모량 0.7 l/min)와 5.0 kcal/min(산소소모량 1.0 l/min)를 초과하지 말아야 한다. RWL 조건하에서는 평균 신진대사 에너지 소모율이 들어올리기 작업조건(시점 높이, 작업시간)에 따라 2.2~4.7 kcal/min(산소소모량 0.44~0.94 l/min)를 초과하지 말아야 한다.

인체심리학적인 관점에서 보면 AL과 RWL 조건하에서는 75% 여성 99% 남성이 처리할 수 있는 중량이며, MPL 조건하에서는 25% 남성 1% 미만의 여성이 감당할 수 있는 중량이 되어야 한다.

그러나 이들 수치는 미국인의 기준이지 한국인의 기준치가 될 수 있는지는 아직 확실하게 알려져 있지 않다. 이러한 면에서 볼 때 무작정 미국의 NIOSH 지침을 우리 한국인에게 적용할 경우 AL,

표 2. 세 가지 접근방법에 따른 AL, MPL, RWL에 대한 기준치

접근방법	설계 기준항목	기준치		
		AL	MPL	RWL
생체역학적	L5/S1의 최대 압축력	3.43 kN(350 kg)	6.37 kN(650 kg)	3.43 kN(350 kg)
생리학적	최대 에너지 소모량 (산소 소모량)	3.5 kcal/min (0.7 l/min)	5.0 kcal/min (1.0 l/min)	2.2~4.7 kcal/min (0.44~0.94 l/min)
인체심리학적	최대 허용중량	여성근로자 75%와 남성근로자 99%에 적합한 중량	남성근로자 25%와 1% 미만의 여성근로자에 적합한 중량	여성근로자 75%와 남성근로자 99%에 적합한 중량

MPL, 그리고 RWL 의 기준치를 한국인에게 적절한 기준치로 재조정해야 할 필요가 있다고 생각한다. 현재 통용되고 있는 미국의 AL, MPL, RWL에 대한 기준치의 비교는 표 2에 요약되어 있다.

2. 연구목적 및 연구범위

본 연구의 근본 목적은 한국인 성인이 작업물체를 인력으로 운반할 경우 허리에 손상을 주지 않고 또한 극도로 피로해 지지 않으면서 동시에 생산량 저하는 초래하지 않을 안전 허용중량을 예측하기 위하여 우선 미국의 NIOSH 지침과 비교 검토하려 하는 것이다. 그리고 한국인의 생리적 작업능력(PWC)이 과연 NIOSH 지침의 생리학적 AL, MPL, RWL 기준치들에 적용되어 질 수 있는가를 검토하는데 또한 그 목적이 있다.

인력물자취급에 따른 우리 나라 사람들의 특히 요통에 의한 산업재해를 줄이고자 미국의 NIOSH 지침서에 따른 최대 안전허용중량이 체격, 근력 등의 신체조건이 현저하게 다른 우리 나라 작업자들에게 적용될 수 있는지를 평가하기 위해서 본 연구의 필요성은 절실하다. 그리고 NIOSH 지침을 한국적으로 이용할 경우 인간공학적 접근방법에 따른 NIOSH 의 기준치와 같은 것을 한국인에게 새로 설정하기 위해서는 본 연구의 필요성은 더욱 중요할 것이다.

본 연구의 범위는 생체역학적, 인체심리학적인 면은 필요한 장비와 인력을 확보할 수 없는 현실임을 감안하여 생리학적 접근방법만을 고려하였다. 여성에 대한 실험은 피실험자의 확보에 어려움이 있어서 이번 연구에서는 고려하지 않았다.

3. 실험장비 및 실험방법

피실험자의 생리적 작업능력을 두 가지 작업방법 (Ergometer test, Treadmill test)에 따라 측정하고 또한 작업조건과 작업하중들에 따른 산소소모량을 측정하기 위하여 아래와 같은 실험장비 및 두 가지 실험을 하였다.

3.1 실험 장비

본 연구에서 사용된 실험기기의 구성은 에너지 대사량 측정기(Metabolic Measurement System), 심장박동수 측정기(Heart Rate Monitor), Ergometer, Treadmill, 작업상자(Container), 작업대(Lifting Table), 인체측정기(Anthropometric

Measurements Set)등으로 하였다.

3.1.1 산소소모량 측정기(O_2 Consumption Measurement Device)

SensorMedics사의 Metabolic Measurement Cart System(MMC-2900 model)을 이용하여 Ergometer, Treadmill, 들어올리기 등의 작업부하에 따른 피실험자의 산소소모량을 측정하였다.

3.1.2 심박계(Heart Rate Monitor)

작업부하에 따른 산소소모량 측정시 매 분당 심박수를 함께 측정하기 위하여 SensorMedics 사의 SaO_2 (Sat-Trak Pulse Oximeter)를 이용하여 측정하였으며 보조 장비로 사용한 기구는 Finland의 POLAR CIC 회사의 POLAR VANTAGE XL Heart Rate Monitor(Polar-77054)로서 매 5초, 15초, 30초 단위로 측정이 가능하였다.

3.1.3 Bicycle Ergometer

Bicycle Ergometer는 미국의 SensorMedics사 Ergoline SMC Ergo-metrics 800S Ergometer로 MMC와 연결되어 자동으로 Workload를 20 watt에서 최대 400 watt 까지 조절할 수 있다. 페달의 회전속도는 일반적으로 50~60 rpm을 사용하나 본 실험에서는 50 rpm으로 고정하여 사용하였다. Sweden의 Monark Bicycle Ergometer는 피실험자들의 적응훈련에 사용되었다.

3.1.4 Treadmill

Treadmill은 MARQUETTE 2000이 사용되었다. 속도는 최대 22.5 km/hr, 등판각도는 수평으로부터 25.0% grade까지 연속적으로 변화시킬 수 있다. 본 실험에서는 평균 5 km/h의 속도로 경사도를 각각 30%, 50%, 75%의 심장박동수 범위(Percentage of Heart Rate Range)에 해당하는 작업부하로 증가 시켰다.

3.1.5 들어올리기 작업(Lifting task) 상자

들어올리기 작업의 상자선택은 미국자료와의 비교를 위해 미국에서 가장 일반적으로 쓰이는 상자를 선택하였다. 크기는 가로 45.72cm×세로 30.48 cm×높이 30.48cm이고, 합판 내지는 종이를 사용하여 나무상자와 종이상자를 만들었다. 길이 15cm, 직경 2cm인 손잡이를 작업상자의 좌우 면의 중앙에 부착하였다.

선택된 하중을 가하기 위해서 내경이 25mm인 PVC 파이프를 수직으로 하여 상자를 가득 채운 후 직경이 25mm인 무게 1kg, 100g, 500g 등의 철봉들을 대칭적으로 배열하여 들어올리는 작업시 무게중심이 상자의 중앙에 위치하여 평형을 이루도록 하였다.

3.1.6 들어올리기 작업 작업대

작업대는 FK(Floor to Knuckle; 0-76cm 높이) 범위에 해당하는 들어올리는 작업을 위해 가로 150cm×세로 80cm×높이 76cm의 책상을 사용하였다. 작업상자의 손잡이 위치가 작업상자의 바닥으로부터 15.24cm 높이에 있으므로 실제로 들어올리는 높이는 바닥으로부터 15.24cm로부터 91.24 cm였다.

3.1.7 인체 제원 측정기(Anthropometric Measurement Device)

신체의 각 부위를 측정하기 위하여 Martin식 인체측정기를 사용하였다.

3.2 실험방법 및 절차

본 연구목적을 달성하기 위해서 아래와 같은 피실험자의 적응훈련과 2가지의 독자적인 실험이 수행되었다.

3.2.1 피실험자 선정 및 적응 훈련

신체 건강한 6명의 남자 대학생을 신장, 체중에 따라 선정하였으며 병력체크를 문진하여 현재 요통이 있거나 과거에 요통 경력이 있는 학생은 제외하였다.

피실험자들이 본 연구의 실험 진행을 잘 이해하고 실험장비 또는 방법에 적응할 수 있도록 하기 위하여 2 주일간의 적응훈련을 실시하였다. 간단한 운동복과 운동화를 착용한 후 마우스 피스를 입에 물고 작업유형에 따라 Bicycle Ergometer와 Treadmill을 시행하였다. 들어올리기 작업의 자세와 들어올리기 범위(0~76cm)에 따른 적응훈련시간을 가졌고, 낮은 작업빈도에서부터 높은 작업빈도로 점차 늘려가면서 적응훈련을 하였다. MMC-에너지대사량 측정기의 마우스피스에 대한 적응력을 키우고, 손잡이에 대한 부담감과 Heart Rate Monitor에 친숙하도록 하였으며, 들어올리는 능력과 실제 현장작업을 하는 것과 같은 들어올리기의 적응훈련을 2주일에 걸쳐 시행하였다. 작업환경은 실내의 온도를 23±3℃로 유지하였고, 습도는 50% 미만일 경우에만 실험을 하였다. 그리고 실험장소의 바닥은 편편한 바닥으로서 장애물이 없고 마찰력이 좋은 바닥으로 하였다.

3.2.2 실험-1 : PWC 측정 실험

Bicycle Ergometer와 Treadmill의 생리적 작업능력(PWC)을 측정하기에 앞서 피실험자를 15분 이상 편안한 자세로 의자에 앉게끔 하여 안정된 상태에서 휴식시키고, 이때 휴식시 심장박동수(RHR)와 산소소모량을 측정하였다. Bicycle Ergometer와 Treadmill의 작업유형에 따른 생리적 작업능력(PWC)은 단계부하기법(Submaximal test)을 사용하였다. 심장박동수비율(Percentage of Heart Rate Range, %HRR)이 30%, 50%, 75%가 되는 작업부하를 가하여 각 단계에 따른 심박수와 산소소모량간의 선형관계에서 회귀분석을 통하여 최대심박수(Maximum Heart Rate, MHR)에 해당하는 최대산소소모량(Maximum Oxygen consumption rate)을 생리적 작업능력(PWC)으로 추정하였다. 상세한 protocol은 참고문헌들(Kamon, and Ayoub, 1976; Kim, 1990; 박지수, 김홍기, 최진영, 1996)에 설명되어 있다.

3.2.3 실험-2 : RWL, AL, MPL 산소소모량 측정 실험

NIOSH 지침서의 RWL, AL, MPL 치를 작업조건(들어올리는 높이, 작업 빈도수)에 따라 산정하고, 이들 중량에 의한 들어올리기 작업을 15분간 실시하여 마지막 1분 동안 각 피실험자의 산소소모량, 심박수를 측정하였다. 1991년의 RWL은 AL, MPL의 경우와는 달리 들어올리기 작업의 시점 높이와 종점 높이의 경우에 따라 계산된 중량 중 안전한 중량을 고려하기 위하여 가벼운 중량값을 택하였다. 본 실험에서는 시점 높이에 대한 중량이 종점 높이에 대한 중량 보다 가벼웠기 때문에 시점 높이에 대한 중량을 RWL 값으로 산정 하였다. 작업대 높이는 한가지 즉, 바닥으로부터 76cm 높이만 고려하고, 들어올리기 작업 상자도 역시 한가지 크기 즉, 가로 45.7 cm×세로 30.48 cm×높이 30.48 cm을 선정하였다. 작업대 높이를 바닥으로부터 76cm 높이로 고려한 이유는 NIOSH Guideline에서 들어올리기 작업의 수직 높이 경계치로 75cm(30 in)를 사용하고 있고 또한 다른 연구의 실험결과들과 비교해 보려는 의도 때문이었다. 들어올리기 작업의 빈도수(lifting frequency)는 2, 5, 8, 11 lifts/min 을 택하였다.

4. 실험결과 및 분석

본 연구에 참여한 6명의 피실험자는 평균 연령

표 3. 피실험자의 인체측정자료

	연 령 (세)	키 (cm)	몸무게 (kg)	Ergometer PWC (ml/min)	Treadmill PWC (ml/min)
평 균 값	20.3	172.8	68.8	2562.71	2874.89
표준편차	1.86	6.35	20.33	200.71	344.83

20.3세, 신장 172.8cm, 몸무게 68.8kg 이였다. Ergometer에 의한 생리적 작업능력 추정치는 Treadmill에 의한 추정치의 89.14%에 해당하였다. 이들 평균 추정치와 표준편차는 표 3과 같다.

1981년과 1991년의 NIOSH Equation에 따른 AL, MPL, RWL에 해당하는 작업안전하중과 그 작업하중에 따른 심박수와 산소소모량 측정결과는 표 4와 같다.

중량물 없이 단지 몸무게만에 의해 빈도수를 2회에서 11회로 증가시켰을 때, 심박수는 89 bpm으로부터 100 bpm 으로 증가했고, 산소소모량은 443에서 803 ml/min 으로 증가하였다. 이 산소소모량을 Ergometer 또는 Treadmill에 의한 PWC의 percentage로 비교해 본 결과는 각각 17.3%에서 31.3%와 15.4%에서 27.9%로 증가하였다.

빈도수 2, 5, 8, 11회에 따른 NIOSH 의 RWL에 해당하는 중량을 들어올리는 작업시, 심박수는 빈도수 8회까지는 94.17에서 102 bpm으로 증가하다가 11회에서는 100 bpm으로 감소하였고, 산소소모량은 585.17에서 803.33 ml/min으로 증가하였다. 이 산소소모량을 Ergometer 또는 Treadmill에 의한 PWC의 percentage로 비교해 본 결과는 각각 22.8%에서 31.2%와 20.4%에서 27.8%로 증가하였다.

빈도수 2, 5, 8, 11회에 따른 NIOSH 의 AL에 해당하는 중량을 들어올리는 작업시, 심박수는 빈도수 8회까지는 92.00에서 110.17 bpm으로 증가하다가 11회에서는 104.17 bpm으로 감소하였고, 산소소모량은 595.67에서 897.83 ml/min으로 증가하다가 11회에서는 812.33 ml/min으로 감소하였다. 이 산소소모량을 Ergometer에 의한 PWC (BPWC)의 percentage로 비교해 본 결과는 각각 23.2%에서 35.0%로 증가하다가 11회에서는 31.7%로 감소하였다. Treadmill에 의한 PWC (TPWC)의 percentage는 20.7%에서 31.2%로 증가하다가 11회에서는 28.3%로 감소하였다.

빈도수 2, 5, 8, 11회에 따른 NIOSH 의 MPL에 해당하는 중량을 들어올리는 작업시, 심박수는 빈도수 8회까지는 103.00에서 120.67 bpm으로 증가하다가 11회에서는 117.50 bpm으로 감소하였고, 산소소모량은 813.67에서 1178.33 ml/min으로 증가하다가 11회에서는 1022.83 ml/min으로 감소하였다. 이 산소소모량을 Ergometer에 의한 PWC의 percentage로 비교해 본 결과는 각각 31.8%에서 46.0%로 증가하다가 11회에서는 39.9%로 감소하였다. Treadmill에 의한 PWC의 percentage는 28.3%에서 41.0%로 증가하다가 11회에서는 35.6%로 감소하였다.

심박수와 산소소모량이 빈도수 2회에서 8회까지는 증가하다가 11회에서는 감소하는 경향은 작업율 (work rate; kg*m/min)의 계산결과 유사한 경향을 나타내고 있는 것으로서 설명이 가능하다.

표 4와 그림 1에서 보듯이 NIOSH의 RWL에 해당하는 중량물을 들어올리는 작업시의 산소소모량은 빈도수 2회를 제외한 다른 빈도수 즉 5, 8, 11회의 경우 모두 RWL에 대한 생리학적 기준치 620 ml/min 보다 22.9~29.6%정도 높았다. NIOSH의 AL에 해당하는 중량물을 들어올리는 작업시의 산소소모량도 빈도수 2회를 제외한 다른 빈도수 즉 5, 8, 11회의 경우 모두 AL에 대한 생리학적 기준치 700 ml/min 보다 16.0~28.3%정도 높았으며, 또한 MPL에 해당하는 중량물을 들

표 4. RWL, AL, MPL에 따른 심박수와 산소소모량

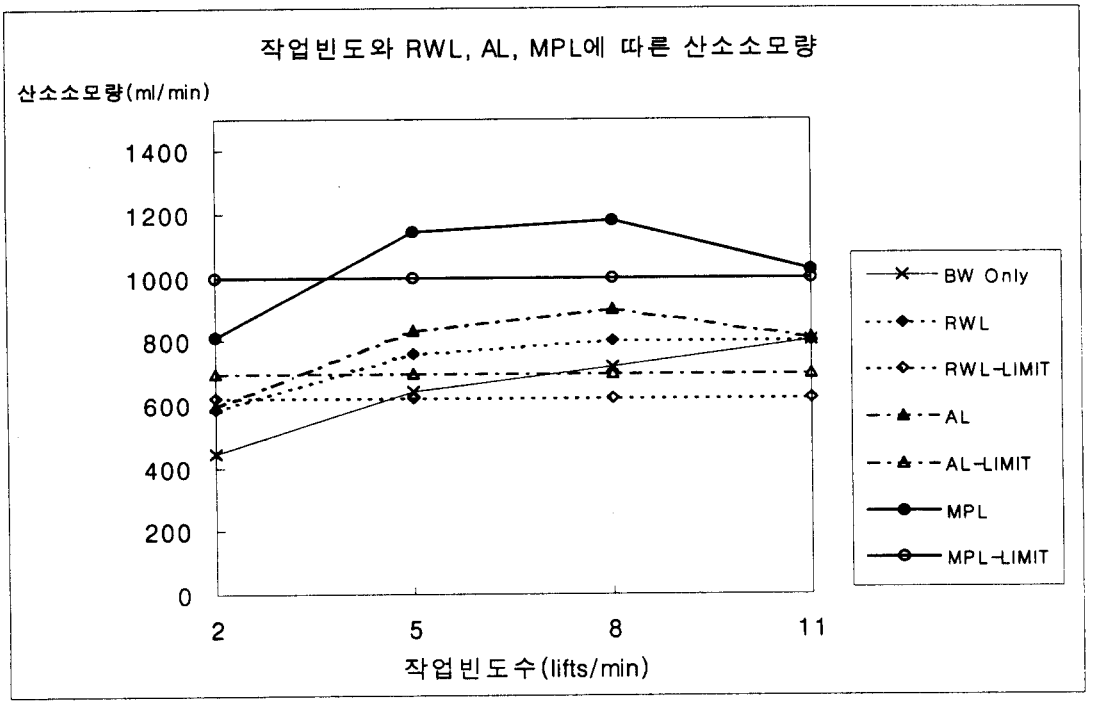
		Frequency (lifts/min)			
		2	5	8	11
BW only	Weight (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00
	Work Rate (kg*m/min)	0.00	0.00	0.00	0.00
	Heart Rate (bpm)	89.00	92.33	64.33	100.00
	$\dot{V}o_2$ (ml/min)	443.00	640.00	716.50	803.33
	$\dot{V}o_2$/BPWC (%)	17.3 %	25.0 %	28.0 %	31.3 %
	$\dot{V}o_2$/TPWC (%)	15.4 %	22.3 %	24.9 %	27.9 %
RWL	Weight (kg)*	6.70	3.61	1.86	0.00
	Work Rate (kg*m/min)	10.21	13.75	11.34	0.00
	Heart Rate (bpm)	94.17	97.50	102.00	100.00
	$\dot{V}o_2$ (ml/min)	585.17	761.67	799.50	803.33
	$\dot{V}o_2$/BPWC (%)	22.8 %	29.7 %	31.2 %	31.3 %
	$\dot{V}o_2$/TPWC (%)	20.4 %	26.5 %	27.8 %	27.9 %
AL	Weight (kg)	10.05	7.03	4.02	1.00
	Work Rate (kg*m/min)	15.32	26.78	24.51	8.38
	Heart Rate (bpm)	92.00	103.67	110.17	104.17
	$\dot{V}o_2$ (ml/min)	595.67	834.17	897.83	812.33
	$\dot{V}o_2$/BPWC (%)	23.2 %	32.6 %	35.0 %	31.7 %
	$\dot{V}o_2$/TPWC (%)	20.7 %	29.0 %	31.2 %	28.3 %
MPL	Weight (kg)	30.14	21.10	12.05	3.01
	Work Rate (kg*m/min)	45.93	80.39	73.46	25.23
	Heart Rate (bpm)	103.00	118.17	120.67	117.50
	$\dot{V}o_2$ (ml/min)	813.67	1140.83	1178.33	1022.83
	$\dot{V}o_2$/BPWC (%)	31.8 %	44.5 %	46.0 %	39.9 %
	$\dot{V}o_2$/TPWC (%)	28.3 %	39.7 %	41.0 %	35.6 %

$\dot{V}o_2$(ml/min) = 분당 산소소모량 (Oxygen Consumption Rate)

BPWC = Bicycle Ergometer PWC

TPWC = Treadmill PWC

* = 들어올리기 작업의 시점 높이 (15.24cm, 손잡이 높이)에 근거한 RWL



RWL-LIMIT : RWL에 대한 생리학적 기준치 = 620 ml/min
AL-LIMIT : AL에 대한 생리학적 기준치 = 700 ml/min
MPL-LIMIT : MPL에 대한 생리학적 기준치 = 1000 ml/min

그림 1. 작업빈도와 RWL, AL, MPL에 따른 산소소모량과 기준치들의 비교

어올리는 작업시의 산소소모량 역시 빈도수 2회를 제외한 다른 빈도수 즉 5, 8, 11회의 경우 모두 MPL에 대한 생리학적 기준치 1000 ml/min 보다 2.3~17.8%정도 높았다.

본 연구에서 실제 측정된 산소소모량을 Garg (1978)와 Kim(1990)의 모델에 적용하여 예측한 산소소모량과 비교해 본 결과는 표 5에서 보는 바와 같이 중량물 없이 단지 몸무게만에 의해 빈도수를 분당 2회에서 11회로 증가 시켰을 때 Garg의 경우 13.26~32.70%, Kim의 경우 21.24~43.06% 정도 더 높게 측정된 것으로 나타났다. NIOSH의 RWL에 해당하는 중량을 들어올리는 작업의 경우는 Garg의 경우보다 20.88~40.11%, Kim의 경우보다 21.24~48.35% 정도 더 높게 나타났다. NIOSH의 AL에 해당하는 중량을 들어올리는 작업의 경우는 Garg의 경우보다 15.72~38.63%, Kim의 경우보다 16.18-44.82% 정도 더 높게 나타났다. NIOSH의 MPL에 해당하는 중량을 들어올리는 작업의 경우는 Garg의 경우보다 30.77~36.52%, Kim의 경우보다 32.34~36.89% 정도 더 높게 나타났다.

표 5. 측정 산소소모량과 Garg, Kim의 모델에 의한 예측치와의 비교

	Frequency (lifts/min)	Weight (kg)	본 연구 $\dot{V}O_2$ (ml/min)	Garg $\dot{V}O_2$ (ml/min)	Net Diff. (ml/min)	% Diff.	Kim $\dot{V}O_2$ (ml/min)	Net Diff. (ml/min)	% Diff.
BW Only	2	0.00	443.00	391.15	51.85	13.26	339.77	103.23	30.38
	5	0.00	640.00	482.29	157.71	32.70	447.37	192.63	43.06
	8	0.00	716.50	573.44	143.06	24.95	554.97	161.53	29.11
	11	0.00	803.33	664.58	138.75	20.88	662.57	140.76	21.24
RWL	2	6.70	585.17	436.69	148.48	34.00	400.89	184.28	45.97
	5	3.61	761.67	543.63	218.04	40.11	513.41	248.26	48.35
	8	1.86	799.50	624.00	175.50	28.12	606.06	193.44	31.92
	11	0.00	803.33	664.58	138.75	20.88	662.57	140.76	21.24
AL	2	10.05	595.67	459.45	136.22	29.65	431.45	164.22	38.06
	5	7.03	834.17	601.75	232.42	38.63	575.99	258.18	44.82
	8	4.02	897.83	682.73	215.10	31.51	665.39	232.44	34.93
	11	1.00	812.33	701.96	110.37	15.72	699.21	113.12	16.18
MPL	2	30.14	813.67	596.00	217.67	36.52	614.72	198.95	32.36
	5	21.10	1140.83	840.82	300.01	35.68	833.41	307.42	36.89
	8	12.05	1178.33	901.04	277.29	30.77	885.97	292.36	33.00
	11	3.01	1022.83	777.10	245.73	31.62	772.86	249.97	32.34

Net Diff. (ml/min) = 본 연구 $\dot{V}O_2$ - 모델에 의한 $\dot{V}O_2$
% Diff. = (Diff. (ml/min) / 본 연구 $\dot{V}O_2$) * 100%

5. 결론 및 토의

중량물이 없을 때와 RWL에 해당하는 중량으로 작업시 산소소모량은 본 연구에 참여한 피실험자의 33% PWC 미만이었으나 AL의 경우는 8회의 경우 33% PWC 보다 높았고, MPL의 경우는 빈도수 2회를 제외한 다른 빈도수에서 모두 33% PWC 보다 높았다. 이점으로 미루어 볼 때 RWL 또는 AL에 해당하는 중량은 본 실험에 참여한 피실험자에게는 안전한 하중으로 간주되어 질 수 있으나, 일반사람들에게 적용하기에는 무리가 있다고 본다.

미성년자의 경우 소년과 소녀의 PWC는 명확한 차이가 없으나 성인의 경우 여성의 PWC는 남성의 PWC의 65~75%에 해당한다(Astrand, Astrand, Hallback, Kilbom, 1973). 또한 나이에 따른 PWC의 영향은 25세를 1.00으로 보았을 때 35세는 0.87, 40세는 0.83, 50세는 0.75, 60세는 0.68의 비율로 추정될 수 있다고 한다 (Astrand, 1960).

이러한 사실에 입각하여 NIOSH AL의 생리학적 기준치 700 ml/min는 미국의 40세 여성의 평균 PWC 2100 ml/min의 33.3% 또는 40세 남성의 평균 PWC 3000 ml/min의 23.3%, 25세 남성의 평균 PWC 3614 ml/min의 19.37%로 고려한 것으

로 볼 수 있다. NIOSH MPL의 생리학적 기준치 1000 ml/min는 미국의 40세 여성의 평균 PWC 2100 ml/min의 47.62% 또는 40세 남성의 평균 PWC 3000 ml/min의 33.3%, 25세 남성의 평균 PWC 3614 ml/min의 27.67%로 고려한 것으로 볼 수 있다. NIOSH RWL의 생리학적 기준치 620 ml/min는 미국의 40세 여성의 평균 PWC 2100 ml/min의 29.52% 또는 40세 남성의 평균 PWC 3000 ml/min의 23.3%, 25세 남성의 평균 PWC 3614 ml/min의 17.15%로 고려한 것으로 볼 수 있다.

이러한 가정에 따르면 본 연구의 남성 평균 20세의 PWC가 2562.7 ml/min이나 25세 평균으로 간주하면 여성 25세의 평균 PWC는 1793.9 ml/min로 추정할 수 있으며, 남성 40세와 여성 40세의 평균 PWC는 연령에 대한 보정 factor 0.83을 고려하면 2127.1 ml/min와 1488.9 ml/min로 추정할 수 있다.

이와 같은 성별과 나이에 대한 보정을 고려하면, 본 연구의 피실험자는 그들의 17.15%, 19.37%, 27.67% PWC 즉 440, 496, 709 ml/min를 NIOSH의 RWL, AL, MPL의 생리학적 기준치로 간주하여야 할 것이다. 그러나 본 연구 결과 하중 없이 단지 몸무게만으로 들어올리는 작업시 빈도수 11회의 산소소모량은 빈도수 2회의 경우보다 약 2배가량 높게 나타났으므로 빈도수에 대한 고려는 필수적이라 할 것이다. 들어올리기 작업에 대해 일괄적으로 Ergometer 또는 Treadmill에 의한 PWC를 기준으로 한다는 것은 타당성이 없다고 본다.

RWL, AL, MPL에 따른 산소소모량은 빈도수 2회의 경우를 제외하고는 각각의 생리학적 기준치보다 2.3-29.6%정도 높게 나타난 사실에 입각하여 보면 NIOSH의 생리학적 기준치를 작업빈도수에 관계없이, 특히 낮은 빈도수(2회 이하)의 작업을 높은 빈도수의 작업과 마찬가지로 일률적으로 적용시킨다는 것은 문제가 있다고 본다. 그러므로 NIOSH의 RWL, AL, MPL의 생리학적 기준치는 작업빈도수를 전혀 고려할 수 없는 Ergometer나 Treadmill에 근거한 PWC보다는 들어올리기 작업의 특성을 감안하고 빈도수에 따른 보정치도 고려한 특별한 PWC, 즉 들어올리기 작업 PWC (Lifting PWC)에 따른 기준치가 설정되어야 할 것이다. 들어올리기 작업 PWC는 ergometer나 treadmill test의 경우와 마찬가지로 submaximal test 방법으로 측정하되 단지 작업부하의 부과방법을 들어올리기 작업에 의한 중량으로 한다는 점만이 다른 것이다.

본 실험을 통하여 측정된 산소소모량과 Garg (1978) 및 Kim(1990)의 모델에 의한 산소소모량을 비교한 결과, 실제 측정치가 모델에 의한 예측치보다 13.26-40.11% 높게 나타났다. 이 것은 외국의 산소소모량 모델을 우리 나라 사람들에게 적용시키는데 문제점이 있다고 본다. 물론 본 실험이 제한된 인원과 연령분포에 의한 결과이므로 속단할 수는 없으므로 추후 성별, 나이, 몸무게에 따른 더 많은 피실험자에 대한 생리적 작업능력(PWC)과 작업량에 따른 산소소모량의 data가 요구된다.

본 연구결과는 미국의 NIOSH 지침서를 한국인에 알맞도록 보정할 수 있는 기초자료가 될 수 있을 것이며 이에 따른 한국적 지침서가 개발된다면 이는 인력물자취급으로부터 연유되는 요통과 같은 산업재해를 줄이는데 많은 도움이 될 것이라 생각한다.

6. 참 고 문 헌

[1] 박지수, 김홍기, 최진영, "작업유형에 따른 생리학적 작업능력의 비교 분석", 대한인간공학회지, Vol. 15(2): pp.89~98, 1996.

[2] 정병용, "연도별(1972-1994) 산업재해의 발생

경향에 관한 연구", 1996년도 대한인간공학회 춘계학술대회 논문집, pp.307~312, 1996.

[3] Astrand, I, "Aerobic Work Capacity in Men and Women with Special Reference to Age", Acta Physiologica Scandinavica, Vol. 49: Suppl. No. 169, 1960.

[4] Astrand, I, Astrand, P. O., Hallback, I., and Kilbom, A., "Reduction in Maximal Oxygen Uptake with Age", Journal of Applied Physiology, Vol.35(5), pp.649~654, 1973.

[5] Cailliet, R., Low Back Pain Syndrome, F.A. Francis Co., Philadelphia, U.S.A., 1981.

[6] 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.

[7] Garg, A., Chaffin, D. B., and Herrin, G. D., "Prediction of Metabolic Rates for Manual Materials Handling Jobs", American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 39(8), pp. 661-674, 1978.

[8] Kamon, E., and Ayoub, M. M., Ergonomics Guide to Assessment of Physical Work Capacity, American Industrial Hygiene Association, Akron, Ohio, U.S.A., 1976.

[9] Khalil, T. M., "Ergonomic Issues in Low Back Pain: Origin and Magnitude of the Problem", Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting-1991, pp.820-824, Human Factors Society, San Francisco, California, U.S.A., 1991.

[10] 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.

[11] 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, Vol. 26, pp.443-448, 1984.

[12] NIOSH Technical Report, Work Practices Guide for Manual Lifting, U.S. Department of Health and Human Services, Cincinnati, Ohio, U.S.A., 1981.

[13] Snook, S. H., and Irvine, C. H., "Maximum Acceptable Weight of Lift", American Industrial Hygiene Association Journal, 28(4): 322-329, 1967.

[14] Stephens, R., Plenary address, Presented at the Human Factors Society 35th Annual Meeting, San Francisco, California, U.S.A., 1991.

[15] Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., Applications Manual for the Revised NIOSH Equation, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Division of Biomechanical and Behavioral Science, Cincinnati, Ohio, U.S.A., 1994.

[16] Webster, B. S., and Snook, S. H., "The Cost of 1989 Worker's Compensation Low Back Pain Claims, Spine, Vol. 19, pp. 1111-1116, 1994.