근력을 이용한 최대허용중량 예측 모델에 관한 인체심리학적 연구

윤훈용† · 추동우*
동아대학교 산업경영공학과 · *대우해양조선
(2009. 3. 11. 접수 / 2009. 4. 14. 채택)

Psychophysical Modeling for Lifting Capacity Using Isometric & Isoinertial Strength Variables

Hoon-Yong Yoon† · Dong-Woo Chu*
Department of Industrial and Management Systems Engineering, Dong-A University
*DSME
(Received March 11, 2009 / Accepted April 14, 2009)

Abstract : The muscular-skeletal disorders that have become a major issue recently in Korean industrial safety area are mainly caused by manual material handling task. The objective of this study is to provide scientific data for the establishment of work safety standard for Korean workers through the experiments of lifting task under various conditions, in order to prevent the muscular-skeletal disorders in the industrial work site. This study used the psychophysical approach to determine the maximum acceptable weight(MAWL) for seven young male subjects, and used isometric and isoinertial strength variables as predictors to develop prediction models. Also, the oxygen consumption, heart rate, and RPE were measured or recorded while subjects were lifting their MAWL. Three different lifting frequencies(1, 3, 5lifts/min) with two lifting range from floor to knuckle height and knuckle to shoulder height for one hour's work shift using free style lifting technique were studied. These results may not only provide scientific data in establishing the safety standards for Korean workers' lifting tasks, but also contribute preventing the rapidly increasing muscular-skeletal disorders lately on the industrial site.
Key Words : manual material handling, maximum acceptable weight of lift, psychophysical approach

1. 서 론

일반적으로 산업 현장에서 발생되는 대부분의 근골격계 상해의 주요 원인은 수동물자취급 작업에 의한 것으로, 특히 건설, 제조, 물류(운수), 컨베이어 벨트로부터 원자재 이동, 창고의 물건 관리 등의 작업분야에선 생산설비의 자동화로 작업자들의 위험한 작업을 많이 감소시켜왔지만, 자동화 설비 비용 등의 경제적인 조건과 공간제약 같은 실제적인 상황들이 제약조건으로 작용해 수동물자취급이 여전히 존재하고 있다.

수동물자취급작업의 개선과 작업자들의 상해를 줄이기 위해 많은 연구가 이루어졌으며, 이러한 수동물자취급작업은 작업자의 특성, 작업 특성, 부하 특성, 환경 특성 등에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 특성들은 작업 수행도에 영향을 미칠 뿐 아니라 근골격계 관련 질환 발생에도 밀접한 관련성이 있어 작업자의 안전을 위협하고 있다.

근골격계질환(musculoskeletal disorders, MSD)은 특정 신체부위 및 근육의 과도한 사용으로 인해 근육, 연골, 건, 인대, 관절, 혈관, 무릎, 팔, 손목 및 손가락 등에 나타나는 만성적인 건강장해를 통칭한다. 미국의 경우 80년대 급증하던 근골격계 질환의 발생이 근골격계질환과 관련된 유해인자 및 관련사항의 실태를 체계적으로 조사하고 분석한 결과 1995년부터 감소하기 시작하여 지금까지 계속 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면에 우리나라의 경우 근골격계 질환과 관련된 실태 파악이 2000년 초부터 이루지고 있어 시기적으로 초기 단계라 아직 정확한 추세를 파악하기는 어려우나 전체 산업 재해 중 근골격계 질환에 대한 중요성 및 인식은 매우 높아지고 있는 실정이다.

† To whom correspondence should be addressed.
yhyoon@dau.ac.kr

근골격계 질환을 예방하기 위해서 작업과 관련된 각 개인의 작업 능력을 파악하는 예비선발 스크린(pre-employment screening), 작업자의 직무 수행에 도움이 되는 훈련 프로그램, 취급 대상물의 중량 제한등과 같은 방법이 사용되는데, 선행 연구의 대부분은 수동물자 취급 작업 시 최대허용중량 파악에 집중되거나, 작업에 영향을 미치는 요인에 대한 평가로 진행되어 왔다.

작업자의 작업 능력, 특히 작업자가 수동물자 취급 시 감당할 수 있는 무게는 그 작업자의 근력측정(maximum voluntary exertion 혹은 maximum voluntary contraction ; MVC)을 통해 알아볼 수 있다. 인간의 근력은 크게 정적근력(static strength)과 동적근력(dynamic strength)으로 나눌 수 있는데, 정적근력은 등척성 근력(isometric strength)으로서 근육이 고정된 정적 상태, 즉 근육의 길이를 변화하지 않는 상태에서 수축하여 최대 힘을 발휘하는 것을 말한다. 동적 근력으로는 등장성 근력(isotonic strength), 등속성 근력(isokinetic strength)그리고 등관성 근력(isoinertial strength)이 있는데, 등장성 근력은 사람의 자발적 최대 근육 수축을 측정하는 것으로서, 근육의 긴장도가 전 동작을 통해 일정하게 유지되는 상태에서의 힘을 말하며, 등속성 근력은 사람의 자발적 최대 근육 수축을 측정하는 것으로서, 동작에 관련된 신체 부분이 일정한 속도로 수축할 때의 힘을, 등관성 근력은 사람이 어느 정해진 지점까지 자기가 정한 어떤 속도에 의해 취급할 수 있는 최대 무게를 측정하여 초기 정적 저항을 극복하는 능력을 말한다.

정적 혹은 동적 근력을 사용하여 들기 작업시의 최대허용중량 예측에 대한 연구가 이루어졌는데 실제 들기 작업은 들기 높이에 따라 근육의 길이와 긴장도가 변하지만 정적근력인 등척성 근력의 경우 근육의 길이나 긴장도가 변하지 않는 상태이므로 최대 허용중량을 예측하는데 있어 상관관계가 낮다는 약점이 있지만, 동적 근력에 비해 상대적으로 측정이 용이하다는 장점도 가지고 있다. 이러한 점을 고려하여 Aghazadeh와 Ayoub(1985). Mital et al.(1986), Mital과 Karwowski(1986) 등은 등척성 근력과 등속성 근력을 이용한 최대허용 중량 예측 모델링에 관한 연구를 하였다. 그 결과 정적 근력인 등척성 근력 보다 동적 근력인 등속성 근력이 더 높은 설명력을 가진다는 것을 알게 되었다.

우리나라의 경우, 인체심리학적 방법(psychophysical method)을 사용하여 수동물자취급작업, 특히 들기작업에서 최대허용중량(maximum acceptable weight of load; MAWL)에 대한 연구와 한국인의 생리학적 작업능력(physical work capacity ; PWC)에 대한 자료가 있지만 상대적으로 미비한 실정이다[1-6].

현재 우리나라의 경우 들기작업에 대한 안전 기준을 미국의 NIOSH의 기준을 사용하고 있지만, 이러한 기준이 한국인의 특성에 적합한 안전 기준인지에 대한 연구가 부족한 상황이다.

본 연구에서는 인체심리학적 연구방법을 사용하여 수동물자취급 작업 중 들기작업의 여러 작업조건 하에서 최대허용중량과 산소소모량(oxygen consumption), 심장박동수(heart rate), 주관적 불편도(ratings of perceived exertion; RPE)를 측정, 비교/분석하였으며, 이때의 최대허용 중량에 대한 실험결과 및 정적근력인 등척성 근력(isometric strength)과 동적근력 중 최대무게와 관련 있는 등관성 근력(isoinertial strength)을 이용하여 최대허용중량을 추정할 수 있는 식을 개발하고자 하였다.

2. 연구방법 및 이론

2.1. 피실험자

피실험자는 허리나 근육에 이상이 없는 신장, 체중, 신체특성을 고려한 신체 건강한 7명의 남자 대학생을 선정하였다. 피실험자의 신체 상태 및 특성을 설명하기 위해 기본적 인체측정, 정적, 동적근력(isometric & isoinertial strength) 및 생리학적 작업능력(PWC)을 측정하였으며, 이에 대한 결과를 Table 1에 보여주고 있다. 피실험자 각각의 생리학적 작업능력은 자전거 에르고미터(bicycle ergome-

Table 1. Summary of the characteristics of the subject

Variables	Means (s.d)
Age (yr)	23.1 (2.0)
Weight (Kg)	75.6 (8.7)
Height (cm)	174.5 (3.9)
Knuckle Height (cm)	76.0 (3.0)
PWC (L/min)	2.91 (0.6)
Isometric strength : Arm (Kg)	37.3 (1.9)
Isometric strength : Back (Kg)	93.6 (12.3)
Isometric strength : Composite (Kg)	117.4 (7.6)
Isometric strength : Shoulder (Kg)	48.7 (6.6)
Isometric strength : Leg (Kg)	109.7 (14.4)
Isoinertial strength: Knuckle to shoulder (Kg)	30.7 (2.7)
Isoinertial strength: Floor to knuckle (Kg)	67.3 (16.3)

ter)에 의한 단계부하기법(sub-maximal technique)을 이용하여 측정하였으며(Astrand and Rodahl, 1986), 정적근력(isometric strength)은 Ayoub et al.(1978)과 Chaffin(1975)이 사용한 방법에 따라 측정하였다. 피실험자의 특성은 Table 1에서 나타내었다.

2.2. 실험기기

본 연구에서 사용된 실험기기의 구성은 피실험자의 산소소모량과 심박수를 측정하기 위해서 CORTEX사의 METAMAX 에너지 대사량 측정기를 사용하였고, 생리학적 작업능력을 측정하기 위해서 부하단계 조절이 가능한 CATEYE ERGOCISE EC-1200을 사용하였다. 등척성 근력(isometric strength) 측정을 위해서는 Jackson 근력평가시스템(Jackson Strength Evaluation System)을 사용하였으며, 등관성 근력(isoinertial strength)은 BTE사의 PRIMUS를 사용 하였다. 실험에 사용된 상자는 42.5cm × 42.5 cm × 21cm의 손잡이가 달려있는 나무상자이며, 손잡이에 대한 적응력을 높이기 위해 상자 위쪽에서 5cm떨어진 부분에 14cm × 4.5cm의 구멍을 뚫어 만들었다. 중량 조절은 알루미늄괴, 돌 등의 불규칙한 무게를 사용하였다. 작업자의 인체측정을 위하여 마틴식 인체측정기가 사용되었다.

2.3. 실험계획

본 연구에서의 독립변수로는 1, 3, 5회/분의 작업빈도수(lifting frequency)와 2가지 들기 범위(Floor~Knuckle, Knuckle~Shoulder)가 사용되었다. 종속변수로는 최대허용중량, 심장박동수, 산소소모량, 주관적 불편도를 측정하였다. 통제변수는 작업상자의 크기(42.5cm × 42.5cm × 21cm)의 나무상자를 사용하였으며 들기형태는 자유형태(free style)로 하였다.

2.4. 실험절차 및 방법

들기작업 실험에 앞서 피실험자의 몸무게와 키를 포함한 기본적인 인체치수를 측정한 후, 실험에 관한 유의 사항을 전달하고 실험내용에 대해 충분히 인지시켰다. 먼저 자전거 에르고미터와 METAMAX 에너지 대사량 측정기를 사용하여 심박수와 산소소모량을 측정하여 피실험자들의 생리학적 작업능력, 즉 최대 산소소모량을 추정하였다(Astrand and Rodahl, 1986). 피실험자의 정적근력, 즉 등척성 근력은 각 신체 부위별(팔, 허리, 어깨, 다리, 복합근력)로 3회씩 측정하여 그 중에서 가장 큰 근력치를 그 부위의 근력으로 선택하였다(Ayoub et al, 1978, Chaffin, 1975, Yoon and Smith, 1999). 동적근력, 즉 등관성 근력은 PRIMUS 기기의 Code No.191 3D motion tool을 이용하여 들기작업과 같은 높이의 최초 시작높이와 종료 높이를 설정하였다. 피실험자가 자각에 의해 최대로 들 수 있는 무게가 될 때까지 실험자가 부하를 조절하는데 피실험자가 주어진 부하량을 들면 2.25kg(약 5lb)를 증가시키고, 들지 못하면 1kg(약 2lb)를 감소시키는 방식으로 측정하였다(Kroemer, 1983, 1985).

들기작업 본 실험을 시작하기 전 피실험자들의 예비친숙기간(familiarization session)을 실시하여 실험 절차에 대해 익숙해지도록 하였는데, 각 피실험자가 2주에 걸쳐 총 6회 (1회당 1시간)의 예비친숙기간을 통해 작업 빈도수와 각도에 따른 여러 가지 들기 작업을 경험해 보도록 하였다.

Snook(1978)이 사용한 인체심리학적 연구방법을 사용하여 피실험자들이 각 실험 조건하에서 1시간 작업하는 동안 무리하거나, 피로하지 않고 들어 올릴 수 있는 최대허용중량을 결정하도록 하였다. 들기 작업 조건의 실시 순서는 각 피실험자 별로 무작위 순서에 의해 실시되었으며, 총 6회의 실험을 이틀에 한번 실시하도록 하였다. 각 실험은 25분에서 30분 정도 자각의식에 의해 피실험자가 1시간의 작업 동안 최대로 들 수 있는 중량을 다양한 무게를 가감하면서 자신에게 맞는 적절한 최대 중량을 선정하도록 하였다. 최대 중량이 선정된 이후 약 10분 동안 선정된 중량으로 들기 작업을 계속하고, 이때 심장 박동수와 산소소모량을 측정하였다. 각 작업이 끝난 후 Borg scale을 사용하여 피실험자의 주관적 불편도(RPE)를 평가하였다.

작업환경은 습도 45~55%, 온도 23±3℃을 유지하였다

3. 결과 및 고찰

각 들기작업 조건에서의 실험 결과 데이터는 분산분석(analysis of variance)을 통해 통계적으로 분석되어 그 결과를 Table 2에 요약하여 보여주고 있다.

최대허용중량의 경우 작업범위와 작업빈도수에 대해 모두 유의한 차이를 보였다($p<0.05$). 심장박동수, 산소소모량의 경우에도 작업빈도수와 작업범위에 대해서 모두 유의한 차이를 보였다($p<0.05$). 각 종속 변수에서의 변수간의 교호작용은 모두 유의차가 없는 것을 알 수 있다($p>0.1$).

Table 2. Summary analysis of variance with MAWL, Heart rate, Oxygen consumption and RPE as the dependent variables (Pr>F) (N=7)

Variable	MAWL	Heart rate	VO2	RPE
Frequency	< 0.0130	< 0.0001	< 0.0001	<0.0001
Range	0.0004	0.0363	0.0003	0.4650
Freq.*Range	0.6499	0.7802	0.3559	0.7889

3.1. 최대허용중량, 심장박동수, 산소소모량, RPE

최대허용중량은 작업 빈도수와 작업범위에 대해 유의적인 차이를 보였으며($p<0.05$), 작업빈도수가 증가할수록 최대허용중량은 감소하는 것으로 나타났다. 심박수, 산소소모량은 작업빈도수가 증가할수록 증가하는 추세를 보였다($p<0.0001$). 작업범위에 대해서는 Floor to Knuckle이 Knuckle to Shoulder 보다 최대허용중량, 심박수, 산소소모량 모두가 높게 나타났다.

피실험자의 주관적 불편도는 작업빈도수에 대해 유의한 차이를 보였으나($p<0.05$) 작업범위에 대해서는 유의한 차이를 볼 수 없었다.

3.2. 모델링

본 연구에서는 여러 가지 들기작업에서 최대허용중량을 작업자의 정적근력(isometric strength), 동적근력(isoinertial strength), 작업빈도수를 통해 추정할 수 있도록 하기 위한 모델링 식을 만들어보고자 하였다. Table 3에 등관성 근력과 작업빈도수를 이용하여 추정된 식을 나타내었다.

Table 4는 stepwise regression technique을 통하여 등척성 근력과 등관성 근력을 이용한 작업높이에 따른 들기작업에서 최대허용중량을 추정할 수 있는 추정식을 나타내었다.

Table 4는 stepwise regression technique을 통하여 등척성 근력과 등관성 근력을 이용한 작업높이에 따른 들기작업에서 최대허용중량을 추정할 수 있는 추정식을 나타내었다.

Table 3. Prediction models using Isoinertial Strength and Frequency as predictors

Task Height	Prediction Model	R-square
Floor to Knuckle	MAWL= -1.73036*Frq +0.17962*ISFK +24.20046	0.4216
Knuckle to Shoulder	MAWL= -1.00179*Frq +0.72751*ISKS +6.19738	0.5232

Frq = Task Frequency 1, 3, 5
ISFK : Isoinertial Strength of Floor to Knuckle height
ISKS : Isoinertial Strength of Knuckle to Shoulder height

Table 4. Prediction models using Strength data and Frequency as preictors

Task Height	Prediction Model	R-square (adj R-sq)
Floor to Knuckle	MAWL= -1.73036*Frq + 0.33298*ISFK - 0.91138*Arm +0.65987*Shd-0.23553*Leg +41.546	0.9442 (0.9255)
Knuckle to Shoulder	MAWL= -1.00179*Frq + 0.67476*ISKS + 0.27669*Shd + 0.05446*Leg -11.63576	0.8649 (0.8312)

Frq = Task Frequency 1, 3, 5
ISFK : Isoinertial Strength of Floor to Knuckle height
ISKS : Isoinertial Strength of Knuckle to Shoulder height
Arm : Isometric Strength for Arm
Shd : Isometric Strength for Shoulder
Leg : Isometric Strength for Leg

Table 5. Comparison of predicted value and measured value

Task Height	Frequency (/min)	Measured value(kg)	Predicted value(kg)	error*	absolute error(%)**
Floor to Knuckle	1	33.45	32.11	-1.34	4.18
	3	29.05	28.65	-0.40	1.40
	5	24.95	25.19	0.24	0.94
Knuckle to Shoulder	1	25.20	24.12	-1.08	4.46
	3	22.55	22.12	-0.43	1.94
	5	20.15	20.12	-0.03	0.17

*error = predicted value - measured value
**absolute error = |error| / |measured value| *100

3.3. 모델링 식에 대한 검증(Validation)

Table 4의 최대허용중량 추정식에 대해 본 실험과 똑같은 조건에서 새로운 피실험자 1명을 선정, 실험하고 그 결과를 이용해 검증하여 Table 5에 비교치를 보여주고 있다. 추정식과 실제 실험을 통해 구해진 최대허용중량과의 차이는 -1.34~0.24kg의 범위를 보이고 있다. 각 높이별 분당 1회 들기작업의 경우 측정치와 예측치간의 차이가 크게 나타나고 나머지 작업의 경우 큰 차이는 보이지 않았다.

4. 결 론

본 연구는 인체심리학적 방법을 사용하여 여러 가지 들기작업 조건에서 1시간 작업시의 최대허용중량 및 그때의 심장박동수, 산소소모량 및 작업의 힘든 정도에 대한 주관적 불편도를 구해 보고자 하였다. 최대허용중량은 작업빈도수가 증가할수록 감소한다. 작업빈도수가 증가하여 최대허용중량은 감소할지라도 심장박동수, 산소소모량, RPE 값은 증가한다. 산소소모량과 심장박동수는 Floor to Knuckle이 Knuckle to Shoulder 보다 높게 나타났다. 본

연구의 경우 피실험자의 선정이 20대의 대학생으로 한정되었고, 피실험자 수 또한 충분치 못한 점을 고려할 때 본 실험결과가 전체 한국인의 들기 작업능력을 반영한다고 보기에 만족스럽다고 할 수 없겠지만 이러한 연구들을 바탕으로 한국인 작업자들의 들기작업에 요구되는 안전성을 높여 작업자의 안전을 도모하고 산업재해를 예방하므로서 재해발생으로 인한 국가 및 기업의 부담을 줄이고 기업경영의 경쟁력 강화와 작업여건 개선을 도모할 수 있으리라 기대된다.

감사의 글 : 이 논문은 2005년도 동아대학교 학술연구비(공모과제)지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1) 김홍기, 인력물자취급의 권장 하중에 대한 생리학적 고찰, 대한인간공학회지, 제16권, 제3호, pp. 23～36, 1997.
2) 박지수, 김홍기, 최진영, 작업유형에 따른 생리학적 작업능력의 비교분석, 대한인간공학회지, 제15권, 제2호, pp. 89～98, 1996.
3) 윤훈용, 한손연속작업의 심리육체학적 모델링, 대한인간공학회 춘계학술대회 논문집, 95～99, 1997.
4) 윤훈용, 대칭과 비대칭 들기작업에서의 인체심리학적 연구, 한국산업위생학회지, 제14권, 제1호, pp. 33～40, 2004.
5) 이관석, 박희석, 직접추정법의 대칭적인 들기작업의 최대허용하중 결정에의 적용에 관한 연구, 대한인간공학회지, 제14권, 제1호, pp. 1～7, 1995.
6) 정성학, 김홍기, 인력물자취급시 작업빈도에 따른 인체심리학적 최대허용중량의 비교연구, 대한인간공학회지 춘계학술논문집, 39～49, 1997.
7) Ayoub MM, Bethea NJ, Deivanayagam S, Asfour SS, Bakken GM, Liles D, Mital A, Sherif M. Determination and modelling of lifting capacity (Final Report), HEW(NIOSH), Grant No. 5R01-OH-00545-02,1978.
8) Astrand P.O, Rodahl K. Textbook of Work Physiology, McGraw-Hill, 1986.
9) Chaffin D.B. Ergonomics guide for the assessment of human static strength. American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 36, pp. 505～511, 1975.
10) Kroemer, K.H.E., An isoinertial technique to assess individual lifting capability, Human Factors, Vol. 25, pp. 493～506, 1983.
11) Kroemer, K.H.E, Testing individual capabilities to lift material : repeatability of a dynamic test compared with static testing, Journal of Safety Resrarch, Vol. 16, pp. 1～7, 1985.
12) Snook S.H. The design of manual material-handling tasks. Ergonomics Vol. 21, pp. 963～985, 1978.
13) Swei-Pi Wu and Sheng-Hsiung Hsu. Psycho-physical modelling of capacity of Chinese males using strength variables, Applied Ergonomics, Vol. 24, No. 4, pp. 251～257, 1999.
14) B. C. Jiang, Psychophysical Modeling of Manual Materials-Handling Capacities Using Isoinertial Strength Variables. Human Factors, Vol. 28, No. 6, pp. 691～702, 1986.
15) Yoon H.Y., Smith J.L. Psychophysical and physiological study of one-handed and two-handed combined tasks. International Journal of Industrial Ergonomics,; Vol. 24, pp. 49～60, 1999.