Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 25, No. 2 pp.11-21, May 2006

여러 가지 들기 작업에서의 인체심리학적 · 생리학적 연구

윤 훈 용

동아대학교 산업경영공학과

Psychophysical and Physiological Study on Various Lifting Tasks

Hoon-Yong Yoon

Department of Industrial & Management Systems Engineering Dong-A University, Busan, 604-714

ABSTRACT

The muscular-skeletal disorders(MSDs) 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. Eight male college students were recruited as participants. Three different lifting frequencies(1, 3, 5 lifts/min) and three twisting angles(including the sagittal plane and two asymmetric angles; i.e., 0°, 45°, 90°) for symmetric and asymmetric tasks, respectively, with three lifting range from floor to knuckle height, knuckle to shoulder, floor to shoulder height for one hour's work shift using free style lifting technique were studied. The maximum acceptable weight of load(MAWL) was determined under the different task conditions, and the oxygen consumption, heart rate, and RPE were measured or recorded while subjects were lifting their MAWLs. The results showed that: (1) The MAWLs were significantly decreased as the task frequency and task angle increased.; (2) The heart rate, oxygen consumption, RPE significantly increased with an increase in lifting frequency although maximum acceptable weight of lift decreased.; (3) The highest heart rate and oxygen consumption was recorded at the lifting range of floor to shoulder, followed by floor to knuckle and knuckle to shoulder.; (4) The RPE value showed that subjects perceived more exertion at the high frequency rate of lifting task and lifting range of floor to shoulder height. (5) The modeling for MAWL using isometric strength, task angle and lifting frequency were developed. It is expected that use of the results provided in this study may prove helpful in reducing MMH hazards, especially from lifting tasks for Korean, and can be used as a basis for pre-employment screening.

Keyword: Modeling, MAWL, Psychophysical study, Lifting task, MSDs

*본 연구는 2002 · 2003년도 한국과학재단 지역대학우수과학자 연구비 지원에 의해 연구되었음(R05-2002-000-00283-0).
교신저자: 윤훈용
주 소: 604-714 부산광역시 사하구 하단동 840, 전화: 051-200-7691, E-mail: yhyoon@dau.ac.kr

1. 서 론

현대 산업현장은 생산 설비의 자동화로 작업자들의 위험한 작업을 많이 감소시켜 왔지만, 자동화 설비 비용 등의 경제적인 조건과 공간제약 같은 실제적인 상황들이 제약조건으로 작용해 상대적으로 자동화가 어렵고 미진한 작업장이 다수를 이루고 있다. 특히 제조나 물류(운수) 분야에서 컨베이어 벨트로부터 원자재 이동, 창고의 물건 관리 등의 작업은 현재까지도 인간의 육체노동을 요하는 수동물자취급(Manual Materials Handling: MMH)에 여전히 의존할 수 밖에 없는 실정이다.

수동물자취급이란 어떤 물체를 인력에 의하여 들어 올리거나 내리거나 밀거나 당기거나 운반에 의하여 한 장소에서 다른 장소로 이동시키는 작업을 말한다. 수동물자취급은 여러 가지 작업환경 하에서 상존하는데, 예를 들면 작업대에 작업물을 반복적으로 들어 올리는 작업, 무거운 지렛대를 미는 작업, 전선이 감겨있는 바퀴(spool)를 이동하는 작업, 간호원이 침대에 눕혀진 환자를 들어 올리는 작업등 허리를 굽히거나 비트는 동작이 포함되는 작업이다.

우리나라의 경우, 최근 근골격계 질환(Muscular Skeletal Disorders : MSDs)으로 인한 업무상 질병자가 급증함에 따라 이에 대한 관심이 높아지고 있는데, 2003년 산업재해원인조사에 의하면, 전체 업무상 질병자 8,640명 중 51%에 달하는 4,439명이 근골격계 질환으로 조사되었으며 이는 2002년도의 1,839명에 비해 2배 이상이 증가한 수치인데, 이러한 근골격계 질환의 약 80%가 반복동작이나 과다한 동작에 의한 것으로 나타났다(2003년 산업재해원인조사). 이러한 반복동작이나 과다한 동작을 요구하는 작업의 대부분이 수동물자취급 작업이고, 그 중에서 들기 작업이 가장 큰 부분을 차지하고 있다 할 수 있는데, 특히 비대칭 작업(Asymmetric lifting)은 허리를 비틀어 물건을 들어 올려야 하므로 대칭 작업(Symmetric lifting) 보다 훨씬 더 위험한 작업으로 알려져 있다. 이러한 들기 작업을 포함한 수동물자취급 작업으로 인하여 근골격계 질환의 증가는 개인뿐만 아니라 기업이나 국가의 경제적 손실을 가져오게 되고, 미국의 경우에는 근골격계 질환의 가장 큰 원인이라 할 수 있는 과다한 동작으로 인해 연간 약 $10 billion 정도가 종업원들의 직접비용으로 지출되는 것으로 조사되었다(Annual report of scientific activity, 2002).

미국의 경우 인체심리학적 연구 방법(Psychophysical approach)을 이용하여 비대칭 들기 작업을 포함한 여러 가지 조건에서의 들기 작업에 대한 많은 연구가 이루어 졌으나, 이는 모두 서양인을 대상으로 실험하였기 때문에 자료 또한 서양인을 기준으로 한 자료라 할 수 있다(Mital and Manivasagan, 1983; Mital and Fard, 1986; Garg and Badger, 1986; Garg and Banaag, 1988; Mital, 1992). 우리나라의 경우, 인체심리학적 방법을 사용하여 들기 작업에서 최대허용중량(Maximum Acceptable Weight of Load; MAWL)에 대한 연구와 한국인의 육체적 작업능력(Physical Work Capacity; PWC)에 대한 자료가 있지만 상대적으로 미비한 실정이며(김홍기, 1997; 박지수 등, 1996; 윤훈용, 1997; 정성학과 김홍기, 1997), 특히 한국인을 대상으로 한 비대칭 작업에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 현재 우리나라의 경우 들기 작업에 대한 안전 기준을 미국의 NIOSH의 기준을 사용하고 있지만, 이러한 기준이 한국인의 특성에 적합한 안전 기준인지에 대한 연구가 부족한 상황이며 이를 뒷받침하기 위해서는 좀 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 인체심리학적 연구 방법을 사용하여 수동물자취급 작업 중 비대칭 작업을 포함한 들기 작업의 여러 작업조건 하에서 작업자가 최대로 작업할 수 있는 한계 중량, 즉 최대허용중량과 그에 따른 산소소모량(Oxygen consumption), 심장박동수(Heart rate), 주관적 불편도(Ratings of Perceived Exertion; RPE)를 측정하여 대칭 작업과 비대칭 작업을 비교분석 하였으며, 실험 결과 및 정적근력(Isometric strength)을 이용하여 최대허용중량을 추정할 수 있는 식을 개발하고자 하였다. 본 연구의 결과를 통하여 우리나라 작업자의 들기 작업시 생산량을 저해하지 않고 신체에 해를 가하지 않는 안전한 작업량의 기준을 정하는데 도움이 되고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 피실험자

피실험자는 대학 내의 포스터를 이용한 공개적인 홍보를 통하여 지원자 중에서 병력체크 및 허리나 근육에 이상이 있었던 사람을 제외하고 신장, 체중, 신체특성을 고려한 신체 건강한 8명의 남자 대학생을 선정하였다. 실험에 참여한 피실험자들에게는 실험참여비가 지급되었다. 피실험자의 신체 상태 및 특성을 설명하기 위해 기본적인 인체측정, 정적근력(Isometric strength) 및 육체적 작업능력(PWC)을 측정하였으며, 이에 대한 결과를 표 1에 보여주고 있다. 피실험자 각각의 육체적 작업능력은 자전거 에르고미터(Bicycle ergometer)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 측정하였

다. 피실험자의 평균 연령은 22.7세, 평균 신장 173.0cm, 평균 체중 72.4kg이었으며, 최대산소소모량(Max. oxygen consumption)은 평균 2.97 l/min, 팔, 허리, 어깨, 다리, 복합근력은 각각 33.7kg, 69.4kg, 39.3kg, 105.9kg, 101.9kg 이었다. 이는 기존의 다른 연구들과 크게 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다(김홍기, 1997; 윤훈용, 1997; 정성학과 김홍기, 1997).

표 1. 피실험자 특성 요약(N=8)

Variables	Mean	S.D
Age(yr)	22.7	1.3
Weight(Kg)	72.4	7.8
Height(cm)	173.0	3.4
Knuckle Height(cm)	74.5	1.9
Physical Work Capacity(l/min)	2.97	0.34
Isometric Strength: Arm(kg)	33.7	6.9
Isometric Strength: Back(kg)	69.4	8.8
Isometric Strength: Composite(kg)	101.9	15.4
Isometric Strength: Shoulder(kg)	39.3	7.6
Isometric Strength: Leg(kg)	105.9	6.1

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. 근력측정을 위해서는 Jackson 근력평가시스템(Jackson strength evaluation)을 사용하였다. 들기 작업 시 사용된 상자는 일반 산업현장에서 자주 사용되어지고 있는 가로 45cm×세로 45cm×높이 21cm의 플라스틱 상자이며, 손잡이에 대한 적응력을 높이기 위해 정사각형의 상자를 선택하였으며 기존의 공구 상자의 형태를 변화하지 않았다. 또한 상자의 규격은 하나로 정했으며 이는 통제변수로 사용되었다. 들기 작업 시 상자의 coupling 상태는 Good, Fair, Poor로 구분되어지는데, 본 연구에서 사용된 상자의 손잡이 상태는 NIOSH Guideline의 기준에 의하면 Poor의 상태이다. 이는 실제 작업현장에서 본 상자를 가장 많이 사용되었기 때문이다.

작업대는 본 실험을 위해 제작된 '자동 들기·내리기 작업 실행기기(Automatic lifting machine)'를 사용하였는데, 들기 작업 시의 작업빈도수, 시점 및 종점으로의 작업대 위치조절, 그리고 작업물 또한 원위치로 동력에 의해 자동으로 위치조절이 가능하도록 되어 있다. 피실험자의 인체측정은 마틴식 인체측정이기가 사용되었다. 그 외 최대허용중량(MAWL)을 측정하기 위해 알루미늄괴, 돌 등의 불규칙한 임의의 무게를 준비하였다.

2.3 실험계획

본 연구에서의 독립변수(Independent variable)로는 작업빈도수(Lifting frequency)와 작업각도(Twisting angle), 들어 올리는 범위 (Range of lifting)가 사용되었다. 작업빈도수는 현장에서 많이 행해지고 있는 작업빈도수를 조사하고 또한 기존의 연구 논문들을 참고하여 분당 1회, 3회, 5회의 들기 작업을 실시하였으며, 작업각도는 허리의 뒤틀림 정도에 따라 대칭 작업인 0° 비대칭 작업인 45°, 90°로 들기 작업을 실시하였다. 들어 올리는 범위는 작업현장 및 기존의 연구 논문들을 참고로 하여 '바닥에서 76cm 높이, 즉 손가락 관절높이(Floor to knuckle height)', '바닥에서 어깨높이(Floor to shoulder)', '손가락 관절에서 어깨높이(Knuckle to shoulder)' 등 3가지 범위의 작업을 실시하였다.

그에 따른 종속변수(Dependent variable)로는 최대허용중량(Maximum Acceptable Weight of Loads; MAWL), 심장박동수(Heart rate), 산소소모량(Oxygen consumption: Vo2), 주관적 불편도(Ratings of perceived exertion)를 측정하였다. 들기 작업시간은 8시간의 작업시간 대신 1시간 작업을 기준으로 하였는데, 이는 본 연구에서와 같은 들기 작업인 경우 1시간 기준의 작업이 하루에 간헐적으로 일어나는 경우가 작업장에서 더 많이 일어날 수 있기 때문이었다. 각 피실험자는 27회의 들기 작업을 무작위 순서로 실행하였으며, 하루에 한번의 들기 작업만을 하도록 하고, 한 번의 들기 작업 후 최소한 하루의 휴식 일을 두도록 하였다.

본 연구에서는 대칭, 비대칭 들기 작업을 분석하기 위하여 randomized complete block factorial design을 사용하였으며, SAS프로그램(SAS v8, SAS Institute, Inc)을 사용하여 통계처리 및 모델링을 하였다.

2.4 실험절차 및 방법

들기 작업 실험에 앞서 피실험자의 몸무게와 키를 포함한 기본적인 인체치수를 측정한 후, 실험에 관한 유의 사항을 전달하고 실험내용에 대해 충분히 인지시켰다. 먼저 자전거 에르고미터와 META MAX 에너지 대사량 측정기를 사용하여 심박수와 산소소모량을 측정하여 피실험자들의 육체적 작업능력, 즉 최대산소소모량을 추정하였다(Astrand and Rodahl, 1986). 피실험자의 정적근력은 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, 1999).

피실험자 각각의 인체측정, 근력측정 및 PWC 측정이 완료된 후, 1주일 동안 들기 작업에 대한 피실험자의 적응훈련과 기기에 대해 친숙할 수 있는 예비친숙기간(familiarization session)이 주어졌으며, 이 시기에서는 본 실험을 위해 들기 작업의 자세와 여러 가지 들기 조건 및 들기 범위에 따른 적응훈련시간을 가졌다. 매일 20~30분 정도 각기 다른 들기 조건(작업빈도수 및 작업각도의 변화) 및 작업범위로 본 실험에서의 여러 가지 다른 작업에 대해 친숙해 지도록 하였으며, 또 다른 이유로는 실험 중에 혹시 일어날 수 있는 안전 사고에 대한 피실험자들의 적응 및 대비를 위함이었다.

예비친숙기간을 마친 후 피실험자 각각은 3 수준의 높이와 3가지 빈도수, 그리고 3종류 작업각도의 조합으로 이루어진 총 27회의 들기 작업을 실시하였다. 들기 작업조건의 실시 순서는 각 피실험자 별로 무작위 순서에 의해 실시되었다. 본 실험 시작 전 2시간 이내에는 피실험자들이 음식물의 섭취나 담배, 술을 삼가도록 하였다.

피실험자들은 각 실험조건 하에서 1시간 동안 작업을 한다는 가정 하에 작업이 모두 끝난 후 너무 피곤하다거나 몸에 이상이 있지 않은 범위 내에서 최대한의 들 수 있는 무게를 결정하도록 하였다. 각 작업조건에서 작업이 시작되면, 처음 25~30분간은 각자의 주관적 최대허용중량을 결정하기 위하여 들기 작업 중에 언제든지 임의의 무게를 가감할 수 있도록 하고, 피실험자가 작업중량으로서 적합하다는 결정이 나면 결정된 마지막 중량을 가지고 약 10~15분간 작업하도록 하였다. 이때 마지막 10분간의 정상 상태(Steady State)에서 마우스 피스를 부착하여 산소소모량과 심장박동수를 측정하여 기록하도록 하였다. 실험이 끝난 후 Borg scale에 따른 주관적 힘든정도를 온몸, 허리, 팔, 어깨 부위에 RPE치수를 통해 측정하도록 하였다. 피실험자가 마지막으로 결정한 중량을 그 작업조건에 대한 최대허용중량으로 기록하였다. 본 실험의 모든 작업조건은 학습효과 및 편의(bias)를 최소한으로 줄이기 위해 각 피실험자 별로 랜덤하게 주어졌으며, 작업환경은 대체로 습도 45~55%와 온도 23℃±3을 유지하였다. 실험이 끝난 후 최대허용중량값과 정적근력 및 여러 가지 변수를 이용하여 최대허용중량값을 쉽게 추정할 수 있는 식을 stepwise regression technique을 통해 구해보고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

각 들기 작업조건에서의 실험 결과 데이터는 분산분석(Analysis of variance)를 통해 통계적으로 분석되어 그 결과를 표 2에 요약하여 보여주고 있다. 최대허용중량의 경우 작업각도, 작업범위 및 작업빈도수에 대해 모두 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 심장박동수, 산소소모량, RPE의 경우에도 작업빈도수와 작업범위, 작업각도에 대해서는 모두 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 각 종속변수에서의 변수간의 교호작용은 모두 유의한 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다(p>0.1).

표 2. 종속변수로서의 MAWL, 심장박동수, 산소소모량, RPE에 대한 ANOVA 요약(Pr>F)(N=8)

Variable	MAWL	Heart rate	Oxygen consumption	RPE
Frequency	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Range	0.0126	<0.0001	<0.0001	0.0122
Angle	<0.0001	0.0291	0.0034	0.0287
Frequency*Range	0.1777	0.9331	0.1803	0.7986
Frequency*Angle	0.9859	0.9902	0.9198	0.4831
Angle*Range	0.5191	0.4813	0.6911	0.1050
Frequency*Angle* Range	0.9798	0.9996	0.9881	0.7389

3.1 최대허용중량

각 작업조건에 따른 피실험자의 최대허용중량에 대한 평균과 표준편차를 표 3에 보여주고 있다. 작업빈도수와 작업각도 각각에 대하여 모두 유의적인 차이를 보였으며(p<0.0001), 작업빈도수와 작업각도가 증가할수록 최대허용중량은 감소하는 것으로 나타났다. 작업빈도수와 작업각도 각각에 대한 SNK(Student-Newman-Keuls) 테스트 결과를 표 4와 표 5에 보여주고 있다. Grouping에서 알파벳이 서로 다른 것은 각 그룹 간에 서로 유의한 차이가 있음을 나타내며(p<0.05), 알파벳이 서로 같은 것은 그 그룹 간에는 유의차가 통계적으로 없음을 나타낸다. 작업빈도수가 1회/분에서 3회/분으로 증가함에 따라 최대허용중량은 약 15% 감소하였으며, 1회/분에서 5회/분으로 증가했을 경우에는 약 21%의 감소를 보였다. 작업각도의 경우 비대칭 들기 작업(시상면을 기준 90° 뒤틀림)을 할 경우 대칭 작업(시상면 기준 0°)일 경우보다 약 10% 정도의 최대허용중량 감소를 보였는데, 이는 Garg and Bannag(1988)의 결과(21%)보다 다소 적은 경향을 보여주고 있다. 작업범위에 따라서는 floor to shoulder일 경우 가장 적은 무게를 들었으며 floor to knuckle 과 knuckle to shoulder의 경우에는 통계적으로 유의차를 보이지는 않았다(표 6).

표 3. 여러 가지 빈도수와 작업각도, 작업범위에서의 평균 최대허용중량값(kg)

빈도수 / 작업각도	Floor to Knuckle			Knuckle to Shoulder			Floor to Shoulder		
	1회/분	3회/분	5회/분	1회/분	3회/분	5회/분	1회/분	3회/분	5회/분
0°	25.5 (4.43)	20.6 (4.41)	18.4 (3.44)	23.2 (2.57)	20.4 (2.26)	18.6 (1.94)	21.2 (3.3)	19.6 (2.83)	18.4 (2.18)
45°	23.0 (3.13)	19.1 (2.77)	17.5 (2.54)	22.1 (2.55)	19.0 (2.56)	17.6 (2.44)	21.4 (2.16)	18.9 (1.65)	18.3 (2.27)
90°	22.8 (1.98)	18.8 (2.67)	17.3 (3.07)	21.4 (2.57)	18.8 (2.71)	17.0 (1.93)	19.7 (3.11)	16.9 (3.13)	15.3 (2.01)

표 4. 빈도수에 따른 최대허용중량값(kg)에 대한 SNK test 결과 (N=72)

Grouping	Mean	N	Frequency
A	22.3	72	1/min
B	19.0	72	3/min
C	17.6	72	5/min

표 5. 작업각도에 따른 최대허용중량값(kg)에 대한 SNK test 결과 (N=72)

Grouping	Mean	N	Angle
A	20.7	72	0°
B	19.7	72	45°
C	18.6	72	90°

표 6. 작업범위에 따른 최대허용중량값(kg)에 대한 SNK test 결과 (N=72)

Grouping	Mean	N	Range
A	20.2	72	floor to knuckle
A	19.8	72	knuckle to shoulder
B	18.8	72	floor to shoulder

표 7. 여러 가지 빈도수와 작업각도, 작업범위에서의 평균 심장박동수(bpm)(N=8)

빈도수 / 작업각도	Floor to Knuckle			Knuckle to Shoulder			Floor to Shoulder		
	1회/분	3회/분	5회/분	1회/분	3회/분	5회/분	1회/분	3회/분	5회/분
0°	90.6 (10.5)	103.1 (12.8)	116.4 (11.0)	87.0 (9.6)	101.8 (8.3)	114.6 (8.5)	93.2 (6.8)	110.1 (12.0)	123.3 (8.3)
45°	90.0 (10.7)	106.6 (10.6)	120.9 (17.4)	90.5 (13.4)	106.0 (15.5)	119.8 (14.9)	98.7 (11.5)	117.9 (11.7)	129.1 (16.1)
90°	92.5 (13.0)	108.4 (9.3)	119.6 (13.4)	90.4 (17.0)	102.9 (15.5)	115.9 (13.0)	102.2 (13.6)	120.4 (16.1)	135.5 (13.3)

표 8. 작업빈도에 따른 심장박동수(bpm)에 대한 SNK test 결과 (N=72)

Grouping	Mean	N	Frequency
A	121.7	72	5/min
B	108.6	72	3/min
C	92.8	72	1/min

표 9. 작업각도에 따른 심장박동수(bpm)에 대한 SNK test 결과 (N=72)

Grouping	Mean	N	Angle
A	109.8	72	90°
A	108.8	72	45°
C	104.4	72	0°

표 10. 작업각범위에 따른 심장박동수(bpm)에 대한 SNK test 결과(N=72)

Grouping	Mean	N	Range
A	114.5	72	floor to shoulder
B	105.3	72	floor to knuckle
B	103.2	72	knuckle to shoulder

3.2 심장박동수

각 작업조건에 따른 피실험자의 심장박동수에 대한 평균과 표준편차를 표 7에 보여주고 있다. 표 7에서 보는 바와 같이 작업빈도수가 증가할수록 심장박동수는 증가하는 추세를 보였으며 통계적으로도 유의한 차이를 보였다(p<0.0001). 작업빈도수에 대한 SNK 테스트 결과를 표 8에 보여주고 있는데, 작업빈도수가 1회/분에서 3회/분으로 증가할 경우 심장박동수는 약 17% 정도 증가하였으며, 1회/분에서 5회/분으로 증가할 경우 심장박동수는 약 30% 증가를 보였다. 작업각도의 증가에 있어서도 대칭 작업과 비대칭 작업 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보였으나(p<0.05), 45도와 90도 간에는 유의차를 보이지 않았다(표 9). 작업범위의 경우 역시 floor to shoulder가 가장 큰 심박수를 보였으며 knuckle to shoulder가 가장 작은 심박수를 보여주고 있다(표 10).

3.3 산소소모량

각 작업조건에 따른 피 실험자의 산소소모량에 대한 평균과 표준편차를 표 11에 보여주고 있다. 심장박동수와 마찬가지로 산소소모량에 있어서도 작업빈도수 및 작업각도에 대한 유의적인 차이를 보였다(p<0.0001). 표 12에 의하면 작업빈도수가 1회/분에서 3회/분으로 증가할 경우 산소소모

량은 약 37%의 증가를 보였으며, 1회/분에서 5회/분으로 작업빈도수가 증가할 경우 약 68%가 증가 하였다. 작업각도의 경우 대칭 작업과 비대칭 작업 간에는 유의한 차이를 보였으나 비대칭 작업 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(표 13). 작업범위의 경우 floor to shoulder 작업이 가장 산소소모량이 많았으며, knuckle to shoulder 작업 시 산소소모량이 가장 적었다(표 14).

표 11. 여러 가지 빈도수와 작업각도, 작업범위에서의 평균 산소소모량(l/m)(N=8)

빈도수 / 작업각도	Floor to Knuckle			Knuckle to Shoulder			Floor to Shoulder		
	1회/분	3회/분	5회/분	1회/분	3회/분	5회/분	1회/분	3회/분	5회/분
0°	0.63 (0.06)	0.86 (0.12)	1.11 (0.13)	0.62 (0.06)	0.83 (0.09)	1.06 (0.19)	0.73 (0.10)	1.05 (0.12)	1.28 (0.09)
45°	0.70 (0.10)	0.92 (0.11)	1.18 (0.12)	0.65 (0.08)	0.92 (0.15)	1.07 (0.19)	0.79 (0.06)	1.13 (0.08)	1.30 (0.13)
90°	0.74 (0.14)	0.93 (0.15)	1.15 (0.12)	0.64 (0.11)	0.86 (0.20)	1.10 (0.17)	0.84 (0.14)	1.16 (0.18)	1.38 (0.18)

표 12. 작업빈도에 따른 산소소모량(l/m)에 대한 SNK test 결과(N=72)

Grouping	Mean	N	Frequency
A	1.18	72	5/min
B	0.96	72	3/min
C	0.70	72	1/min

표 13. 작업각도에 따른 산소소모량(l/m)에 대한 SNK test 결과(N=72)

Grouping	Mean	N	Angle
A	0.97	72	90°
A	0.96	72	45°
B	0.91	72	0°

표 14. 작업범위에 따른 산소소모량(l/m)에 대한 SNK test 결과(N=72)

Grouping	Mean	N	Range
A	1.07	72	floor to shoulder
B	0.91	72	floor to knuckle
C	0.86	72	knuckle to shoulder

3.4 작업의 주관적 불편도(RPE)

각 작업조건에 따른 피실험자가 느끼는 작업의 전체적인 힘든 정도(RPE value)에 대한 평균과 표준편차를 표 15에 보여주고 있다. 작업빈도수, 작업각도, 작업범위에 대해 유의적인 차이를 보였다(p<0.05). 작업빈도수, 작업각도, 작업범위에 대한 SNK 테스트 결과를 표 16~18에 보여주고 있는데, 작업빈도수가 5회/min일 경우 "힘들다 (hard)"고 느꼈으며 3회/min, 1회/min 순이었다. 비대칭 작업 간에는 통계적인 유의차 없이 "어느 정도 힘들다 (somewhat hard)"고 느끼고 있었다.

표 15. 여러 가지 빈도수와 작업각도, 작업범위에서의 평균 RPE값(N=8)

빈도수 / 작업각도	Floor to Knuckle			Knuckle to Shoulder			Floor to Shoulder		
	1회/분	3회/분	5회/분	1회/분	3회/분	5회/분	1회/분	3회/분	5회/분
0°	11.1 (1.0)	12.3 (1.03)	14.1 (1.25)	12.3 (1.03)	13.6 (1.41)	14.5 (1.6)	11.3 (1.48)	12.5 (1.20)	14.1 (1.46)
45°	11.5 (0.92)	13.9 (1.35)	14.4 (1.06)	12.4 (1.5)	13.8 (1.16)	14.5 (1.93)	12.6 (1.41)	13.6 (1.19)	14.4 (2.13)
90°	12.0 (0.76)	12.3 (1.83)	13.9 (1.13)	12.4 (1.5)	13.5 (1.07)	14.4 (1.3)	12.5 (2.0)	13.6 (2.13)	15.8 (0.71)

표 16. 작업빈도에 따른 RPE값에 대한 SNK test 결과(N=72)

Grouping	Mean	N	Frequency
A	14.4	72	5/min
B	13.2	72	3/min
C	12.0	72	1/min

표 17. 작업각도에 따른 RPE값에 대한 SNK test 결과(N=72)

Grouping	Mean	N	Angle
A	13.4	72	45°
A	13.3	72	90°
B	12.9	72	0°

표 18. 작업범위에 따른 RPE값에 대한 SNK test 결과(N=72)

Grouping	Mean	N	Range
A	13.5	72	knuckle to shoulder
A	13.4	72	floor to shoulder
C	12.8	72	floor to knuckle

3.5 모델링

본 연구에서는 여러 가지 들기 작업에서 최대허용중량을 작업자의 정적근력(isometric strength), 작업빈도수, 작업자의 키, 몸무게를 통해 추정할 수 있도록 하기 위한 모델링식을 만들어 보고자 하였다. 이전의 연구(Wu, 1993; Jiang

et al, 1986)에서도 논의된 바와 같이 최대허용중량의 경우 isokinetic strength(등속성 근력)나 isoinertial strength를 통한 추정이 isometirc strength(등척성 근력; 정적근력)보다는 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있으나, 우리나라의 경우 현재까지 정적근력을 통한 최대허용중량의 추정도 연구되지 못하였으므로, 본 연구에서는 여러 가지 실험기기상의 한계점으로 인하여 정적근력만을 가지고 최대허용중량을 추정해 보고자 하였다. 표 19에 stepwise regression technique을 통해 각 들기 작업구간에서 최대허용중량을 추정하는데 사용되어진 변수들을 보여주고 있다. 아래 표에서 구해진 추정식들은 작업빈도수와 작업각도를 사용하는데 있어서 한계점을 가지고 있는데 이러한 문제점들은 추후 더 많은 데이터와 연구를 통해 보완이 가능할 것으로 생각된다.

3.5.1 모델링 식에 대한 검증(validation)

표 19에 보여진 최대허용중량 추정식에 대해 피실험자 2명의 실험 결과를 가지고 검증을 해 보고자 하였다. 검증을 위한 실험은 본 실험이 모두 끝난 후 같은 실험조건에서 2명의 피실험자를 새로이 선정하여 실험하였다. 표 20과 표 21에 모델 1과 모델 2 각각에 대한 2명의 피실험자 측정 데이터와 추정식에 의해 추정된 값과의 비교치를 보여주고 있다.

표 19. 정적근력, 작업각도, 작업빈도수를 이용한 예측 모델식

Range	Model	R-square
Floor to Knuckle	(model 1) Mawl = 8.30 −0.0246 x Angle − 1.4989 x PFR + 0.2525 x back	0.6344
	(model 2) Ln(Mawl) = 2.4456 − 0.0015 x Angle + 0.0067 x Comp − 0.0456 x PFR	0.6494
Knuckle to Shoulder	(model 1) Mawl = 14.4565 − 0.0185 x Angle + 0.2431 x Shd − 1.1167 x PFR	0.7596
	(model 2) Ln(Mawl) = 2.7253 − 0.0001 x Angle + 0.0118 x Shd − 0.0562 x PFR	0.7702
Floor to Shoulder	(model 1) Mawl = 10.2097 − 0.0272 x Angle + 0.1052 x Comp + 0.044 x Shd − 0.8615 x PFR	0.6630
	(model 2) Ln(Mawl) = 2.4456 − 0.0015 x Angle + 0.0067 x Comp − 0.0456 x PFR	0.6494

PFR = 5 : 작업 빈도수가 5회/min
3 : 작업 빈도수가 3회/min
1 : 작업 빈도수가 1회/min
Angle: tasking angle
Shd : Isometric strength for shoulder
Comp: Isometric strength for composite
Back : Isometric strength for back

표 20의 모델 1의 최대허용중량 추정식 결과와 실제 실험을 통해 구해진 최대허용중량과의 차이는 floor에서 knuckle 구간에서 0.8~4.7kg, knuckle에서 shoulder 구간에서 0.4~2.1kg, floor에서 shoulder 구간에서는 0.1~2.7kg의 범위를 보이고 있다. 에러 비율을 보면 두 번째 피실험자가 floor에서 knuckle 구간에서 빈도수가 분당 5회, 90도 비대칭 작업 시 약 23%의 차이로 가장 큰 차이를 보였으며, 첫 번째 피실험자의 경우 floor에서 shoulder 구간에서 빈도수 5회, 90도 비대칭 작업의 경우 0.6%의 차이만을 보였다. 표 21의 모델 2의 최대허용중량 추정식 결과와 실제 실험을 통해 구해진 최대허용중량과의 차이를 에러 비율로 보면, floor에서 knuckle 구간에서 최대 11.89%, 최소 6.08%, knuckle에서 shoulder 구간에서는 최대 1.33%, 최소 0%, floor에서 shoulder 구간에서는 최대 5.81%, 최소 0%의 차이를 보였다. 전체적으로 볼 때 표 19의 각 추정식의 R-square값에서도 볼 수 있듯이 모델 2 추정식이 최대허용중량을 예측하는데 모델 1의 추정식보다 조금 더 정확할 수 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구는 인체심리학적 방법을 사용하여 비대칭 들기 작업(Asymmetric lifting task)을 포함한 여러 가지 들기 작업 조건에서 1시간 작업 시의 최대허용중량 및 그때의 심장박동수, 산소소모량 및 작업의 힘든 정도에 대한 주관적 척도를 구해 보고자 하였다. 본 연구에서의 결과와 기존 연구의 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 최대허용중량은 들기 작업빈도수의 변화에 영향을 받으므로 작업빈도수가 증가할수록 최대허용중량은 감소한다. 작업빈도수가 증가하여 최대허용중량은 감소할 지라도 심장박동수, 산소소모량, RPE 값은 증가한다.

둘째, 최대허용중량은 작업각도의 변화에 영향을 받으므로 비대칭 작업의 각도가 증가하면 최대허용중량은 감소한다. 하지만 심장박동수, 산소소모량, RPE 값은 대칭 작업과 비대칭 작업 사이에는 통계적으로 유의한 차이를 나타내지만 비대칭 작업 간에는 통계적으로 차이를 보이지 않았다.

셋째, 산소소모량과 심장박동수는 바닥에서 어깨까지(Floor to shoulder)의 작업 높이에서 가장 높게 나타났으며, 그 다음이 바닥에서 손가락 관절까지(Floor to knuckle), 손가

표 20. 모델 1 식에 대한 측정치와 예측치 비교

Task Range	Subject	Angle(°)	Frequency (/min)	Measured value(kg)	Predicted value(kg)	Error*	Absolute error (%)**
Floor to knuckle	1	0	1	28.8	29.7	0.9	3.22
			3	24.7	26.7	2.0	8.22
			5	20.8	23.7	2.9	14.1
		90	1	26.6	27.4	0.8	2.96
			3	21.6	24.4	2.8	12.91
			5	20.6	21.4	0.8	3.84
	2	0	1	25.4	24.2	−1.2	4.63
			3	22.8	21.2	−1.6	6.90
			5	20.2	18.2	−2.0	9.53
		90	1	25.6	21.9	−3.7	14.52
			3	21.7	18.9	−2.8	12.97
			5	20.6	15.8	−4.7	22.87
Knuckle to shoulder	1	0	1	24.5	23.6	−0.9	3.86
			90	21.8	21.3	−0.5	2.20
			5	18.7	19.1	0.4	2.07
		90	1	23.7	21.9	−1.8	7.64
			3	21	19.7	−1.3	6.40
			5	19.5	17.4	−2.1	10.65
	2	0	1	22.3	21.6	−0.7	3.10
			3	19.1	19.4	0.3	1.70
			5	16.8	17.1	0.3	2.03
		90	1	20.6	19.9	−0.7	3.19
			3	19.5	17.7	−1.8	9.18
			5	16.7	15.5	−1.2	7.32
Floor to shoulder	1	0	1	26.2	23.5	−2.7	10.28
			3	22.3	21.8	−0.5	2.32
			5	20.8	20.1	−0.7	3.56
		90	1	23.6	21.1	−2.5	10.77
			3	21.0	19.3	−1.7	7.93
			5	17.5	17.6	0.1	0.63
	2	0	1	25.3	23.5	−1.8	7.24
			3	20.5	21.7	1.2	6.07
			5	19.8	20.0	0.2	1.12
		90	1	21.5	21.0	−0.5	2.23
			3	20.0	19.3	−0.7	3.51
			5	15.3	17.5	2.2	14.86

*error = (predicted value − measured value), **absolute error = |error|/|measured value| × 100

락 관절에서 어깨까지(Knuckle to shoulder) 순으로 나타났다.

넷째, 작업의 힘든 정도는 작업빈도수가 높을수록 더 힘들게 느꼈으며, 작업범위에서는 바닥에서 어깨까지(Floor to shoulder)의 작업범위가 가장 힘들게 느끼는 것으로 나타났다.

다섯째, 본 연구에서 정적근력 및 작업각도를 통해 추정되어진 최대허용중량값은 isoinertial strength나 등속성 근

표 21. 모델 2 식에 대한 측정치와 예측치 비교

Task Range	Subject	Angle(°)	Frequency (/min)	Ln(Mawl)	Predicted value	Error*	Absolute error (%)**
Floor to knuckle	1	0	1	3.36	2.98	−0.37	11.23
			3	3.20	2.89	−0.31	9.82
			5	3.03	2.80	−0.23	7.73
		90	1	3.28	2.84	−0.44	13.19
			3	3.07	2.75	−0.32	10.28
			5	3.02	2.66	−0.36	11.89
	2	0	1	3.23	3.00	−0.23	7.16
			3	3.12	2.91	−0.21	6.87
			5	3.00	2.82	−0.18	6.08
		90	1	3.24	2.86	−0.37	11.55
			3	3.07	2.77	−0.30	9.76
			5	3.02	2.68	−0.34	11.22
Knuckle to shoulder	1	0	1	3.19	3.16	−0.03	1.06
			90	3.08	3.05	−0.03	0.96
			5	2.92	2.93	0.01	0.38
		90	1	3.16	3.15	−0.01	0.30
			3	3.04	3.04	0	0
			5	2.97	2.93	−0.04	1.33
	2	0	1	3.10	3.07	−0.03	1.10
			3	2.94	2.95	0.01	0.36
			5	2.82	2.84	0.02	0.85
		90	1	3.02	3.06	0.04	1.19
			3	2.97	2.94	−0.03	0.72
			5	2.82	2.83	0.01	0.74
Floor to shoulder	1	0	1	3.26	3.18	−0.08	2.50
			3	3.10	3.09	−0.01	0.38
			5	3.03	3.00	−0.03	1.10
		90	1	3.16	3.04	−0.12	3.55
			3	3.04	2.95	−0.09	2.85
			5	2.86	2.86	0	0
	2	0	1	3.23	3.20	−0.03	0.83
			3	3.02	3.11	0.09	3.05
			5	2.98	3.02	0.04	1.20
		90	1	3.06	3.07	0.01	0.03
			3	2.99	2.98	−0.01	0.59
			5	2.72	2.88	0.16	5.81

*error = (predicted value − measured value), **absolute error = |error|/|measured value| × 100

력를 통해 추정 되어지는 값보다 정확성이 떨어지는 것은 사실이지만 본 연구를 시작으로 앞으로 좀 더 최대허용중량 값에 근접한 값을 추정할 수 있는 모델링 식이 개발되기를 기대한다.

외국의 연구들과 본 연구 결과와의 차이점에 대해서는 본 연구에서 사용된 여러 가지 요인들(상자의 크기, 피실험자 특성, 작업조건, 작업환경 등등)이 기존의 다른 연구들과 정확히 일치하지 않기 때문에 본 실험에서 결정된 최대허용중

량값을 기존의 다른 연구들과 정확히 비교하는 것은 무리가 있다 하겠다. 특히 미국을 비롯한 서양의 경우 들기 작업에 대한 인체심리학적 연구가 많이 이루어져 최대허용중량에 자료가 많으나, 이를 우리나라의 자료와 직접적으로 비교하기에는 기본적으로 작업자들의 신체조건 차이로 인해 큰 의미가 없을 것이다. 동양인의 경우 아직까지 들기 작업에 대한 인체심리학적 연구가 많이 이루어지고 있지는 않지만 우리나라와 중국의 경우 몇몇 연구가 이루어져 왔다(김홍기, 1997; 정성학, 김홍기, 1997; Wu, 2000). 실험 요인들이 정확히 일치하지 않아 정확한 비교는 될 수 없겠지만, 최대허용중량값을 같은 동양인으로서 중국의 결과와 비교해 본다면, 본 연구의 최대허용중량이 같은 작업조건에서 중국 연구 결과보다 작았는데(Wu, 2000), 이는 두 연구 간의 작업상자가 일치하지 않은 것을 비롯하여 몇 가지 실험상의 원인들도 있겠지만, 같은 동양인이라 할지라도 일반적인 신체조건은 물론, 문화적인 요인에서부터 심리적인 요인까지 일치하지 않으므로 우리나라와 근접한 동양권의 자료를 검증 없이 사용하는 것도 신중을 기해야 할 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고, 본 연구의 목적 중의 하나라 할 수 있는 인체심리학적 방법에 의한 작업 빈도수와 작업각도가 최대허용중량의 결정에 미치는 영향을 조사한 결과는 기존의 다른 연구 결과와 일치함을 보여주고 있다(Mital and Fard, 1986; Garg and Banaag, 1998; Wu, 2000). 즉, 작업빈도수와 작업각도가 증가할수록 최대허용중량은 감소한다는 결과를 본 연구 결과에서도 알 수 있었다. 본 연구에서의 작업빈도수에 따른 심장박동수는 1시간 작업 시의 허용 가능한 심장박동수 범위인 120~130beat/min를 넘지 않고 있으며(AIHA Technical Committee, 1971), 작업빈도수가 증가할수록 심장박동수 또한 증가한다는 기존의 연구들과도 같은 결과를 보여주고 있다(Garg and Banaag, 1988; Wu, 2000). 작업의 힘든 정도에 따른 피실험자들의 주관적 척도(RPE)의 경우 작업빈도수가 증가할수록 힘든 정도가 통계적으로 유의하게 증가하였으며 이는 기존의 다른 연구와 동일한 결과를 보였다(Garg and Banaag, 1998; Wu, 2000).

본 연구에서는 피실험자의 선정이 20대의 대학생으로 한정되었고, 피실험자 수 또한 충분치 못한 점을 고려할 때 본 실험 결과가 전체 한국인의 들기 작업능력을 반영한다고 보기에는 만족스럽다고 볼 수 없겠지만, 이러한 연구들을 바탕으로 한국인 작업자들의 들기 작업에 요구되는 안전성을 높여 작업자의 안전을 도모하고 산업재해를 예방함으로써 재해발생으로 인한 국가 및 기업의 부담을 줄이고 기업 경영의 경쟁력 강화와 작업여건 개선을 도모할 수 있으리라 기대된다. 또한 본 연구에서 결정된 최대허용중량이나 결과들이 기존 서양의 자료와 중국의 자료와 차이를 보이고는 있지만, 현실적인 한국 노동인력에 대한 작업능력을 추정하기 위해서는 성별과 연령을 고려한 광범위한 연구를 통해 여러 가지 들기 작업조건에서의 한국인의 안전 기준을 설정하는 노력이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

김홍기, 인력물자취급의 권장 하중에 대한 생리학적 고찰. *대한인간공학회지*, 16(3), 23-36, 1997.

박지수,김홍기,최진영, 작업유형에 따른 생리학적 작업능력의 비교분석. *대한인간공학회지*, 15(2), 89-98, 1996.

윤훈용, "한손연속작업의 심리육체학적 모델링", *대한인간공학회 춘계학술대회 논문집*, 95-99, 1997.

이관석, 박희석, 직접추정법의 대칭적인 들기 작업의 최대허용하중 결정에의 적용에 관한 연구, *대한인간공학회지*, 14(1), 1-7, 1995

정성학, 김홍기, "인력물자취급시 작업빈도에 따른 인체심리학적 최대허용중량의 비교연구", *대한인간공학회지 춘계학술논문집*, 39-49, 1997

한국산업안전공단. *2002년 산업재해원인조사*. 2003.

한국산업안전공단. *2003년 산업재해원인조사*. 2004.

A.I.H.A. Technical Committee. Ergonomics guide to assessment of metabolic and cardiac costs of physical work. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 32, 560-564, 1971.

Ayoub, M. M. and Mital, A., *Manual Material Handling*, Taylor & Francis, London, 1989.

Ayoub, M. M., Bethea, N. J., Deivanayagam, S., Asfour, S. S., Bakken, G. M., Liles, D., Mital, A. and Sherif, M., Determination and modelling of lifting capacity(Final Report, HEW(NIOSH), Grant No. 5R01-OH-00545-02, 1978.

Astrand, P. O. and Rodahl, K., *Textbook of Work Physiology*. McGraw-Hill, 1986.

Borg, G. A. V., and Noble, B. I., *Perceived Exertion. Exercise and Sports Science Review*, New York: Academic Press, 1974.

Chaffin, D. B., Ergonomics guide for the assessment of human static strength. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 36, 505-511, 1975.

Ciriello, V. M., Snook, S. H., Hashemi, L. and Cotnam, J., Distributions of manual materials handling task parameters. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24, 379-388, 1999.

Dempsey, P. G. and Hashemi, L., Analysis of worker's compensation claims associated with manual materials handling, *Ergonomics*, 42, 183-195, 1999.

Garg, A., and Badger, D. Maximum acceptable weights and maximum voluntary isometric strengths for asymmetric lifting. *Ergonomics*, 29, 879-892, 1986.

Garg, A., and Banaag, J. Maximum acceptable weights, heart rates and RPEs for one hour's repetitive asymmetric lifting. *Ergonomics*, 31, 77-96, 1988.

Leamon, T. and Murphy, P. I., Ergonomics losses in the workplace: their reality. In: Aghazadeh, F. (ed.), *Advances in Industrial Ergonomics*

and Safety VI. London: Taylor & Francis, London, p.81-88, 1994.

Mital, A., Psychophysical capacity of industrial workers for lifting symmetrical and asymmetrical loads symmetrically and asymmetrically for 8h work shifts. *Ergonomics*, 35, 745-754, 1992.

Mital, A. and Fard, H. F., Psychophysical and physiological responses to lifting symmetrical and asymmetrical loads symmetrically and asymmetrically. *Ergonomics*, 29, 1263-1272, 1986.

Mital, A. and Manivasagan, I., Maximum acceptable weight of lift as a function of material density, c.g. location, hand preference, and frequency. *Human Factors*, 25, 33-42, 1983.

Murphy, P.L. and Courtney, T. K., Low back pain disability: relative costs by antecedent and industry group. *American Journal of Industrial Medicine*, 30, 130-141, 1996.

Pope, M. H., Anderson, G. B. J, Frymoyer, J. W. and Chaffin, D. B., *Occupational Low Back Pain*, Mosby Year Book, St. Louis, 1991.

Snook, S. H., The design of manual material handling tasks. *Ergonomics*, 21, 963-985, 1978.

Snook, S. H. and Irvine, C. H., Maximum acceptable weight of lift. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 27, 322-329, 1967.

SAS, *Users Guide: Statistics*, SAS Institute Inc. 5th ed. Box 8000, Cary, NC 27511, 1985.

Wu, S., Psychophysically determined symmetric and asymmetric lifting capacity of Chinese males for one hour's work shifts. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 25, 675-682, 2000.

Wu, S. and Hus, S. H., "Psychophysical modelling of lifting capacity of chinese males using strength variables", *Applied Ergonomics*, 24(4), 251-257, 1993.

Yoon, H. Y. and Smith, J. L., Psychophysical study and physiological study of one-handed and two-handed combined tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24, 49-60, 1999.

◐ 저자 소개 ◑

❖ 윤 훈 용 ❖ yhyoon@dau.ac.kr

Texas Tech University I.E. 박사
현 재: 동아대학교 산업경영공학과 부교수
관심분야: 근골격계 질환, 수동물자취급작업,
제품설계 및 사용성 평가, 기업의 사회적 책임

논 문 접 수 일 (Date Received) : 2006년 03월 13일
논 문 수 정 일 (Date Revised) : 2006년 04월 16일
논문게재승인일 (Date Accepted) : 2006년 04월 24일