

외부 부하와 반복에 따른 팔 동작의 심물리학적 자세 부하

기도형[†]

계명대학교 산업시스템공학과

Psychophysical Stress of Arm Motions at Varying External Load and Repetition

Dohyung Kee

Department of Industrial and Systems Engineering, Keimyung University, Daegu, 704-701

This study aims to investigate effect of external load and motion repetitiveness on perceived discomfort. An experiment was performed for measuring discomfort scores at varying conditions, in which external load, motion repetitiveness and arm posture were employed as experimental variables. The arm posture was controlled by shoulder flexion and abduction, and by elbow flexion. Fifteen healthy college-age students without history of musculoskeletal disorders voluntarily participated in the experiment. The results showed that the effect of external load, motion repetitiveness and shoulder posture on discomfort were statistically significant, but that elbow posture did not significantly affect discomfort ratings. The effect of external load was much larger than that of any other variables, and that of repetitiveness was second only to external load. Discomfort scores significantly increased linearly as the levels of external load and motion repetitiveness increased. This implies that although they were not fully reflected in the existing posture classification scheme such as OWAS, RULA, etc., the effect of external load and motion repetitiveness should be taken into consideration for precisely quantifying work load in industry. Based on regression analysis, equivalent values of external load and motion repetitiveness in terms of discomfort scores were provided, which would be useful for better understanding the degree of their effect on work load.

Keywords: external load, motion repetitiveness, discomfort, psychophysical method

1. 서론

최근 들어 우리나라의 산업안전 분야에서 가장 큰 문제 중의 하나로 취급되고 있는 작업 관련성 근골격계질환(work-related musculoskeletal disorders)은 인체의 근골격계에 과도한 부하가 반복적으로 가해질 때 근육, 인대, 건(tendon), 신경 등의 미세 조직에 손상이 발생하여 불편함, 통증, 장애 등을 유발하는 증상을 통칭하는 것이다(Hagberg *et al.*, 1995). 노동부에서 매년 발표하고 있는 산업재해 통계에서 근골격계질환은 직업병 중 신

체부담작업과 요통으로 분류되고 있으며, 2002년도에 1,827건이 발생하였으며 직업병의 약 43.6%, 전체 산업재해의 약 2.2%를 차지하였다(Ministry of Labor, 2003). 근골격계질환은 작업 관련 요인, 작업자 특성 요인, 사회심리적(psychosocial) 요인 등의 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 유발되는 것으로 알려져 있다(Winkel and Mathiassen, 1994). 근골격계질환은 한번 발병하면 장기간의 요양을 요하는 등 작업자 개인과 기업측 모두에게 심각한 손실을 초래하는 특징이 있다. 근골격계질환으로 인한 손실을 막기 위해서는 작업 방법 및 작업장의 인간공학

본 연구는 2002년도 계명대학교 비사연구기금으로 수행되었음.

[†]연락처 : 기도형 교수, 704-701, 대구시 달서구 신당동 1000 계명대학교 산업시스템공학과, Fax : 053)580-5165,

E-mail : dhkee@kmu.ac.kr

2003년 12월 13일 접수, 1회 수정 후 2004년 5월 12일 게재 확정.

적 개선을 통한 예방이 중요하며, 이를 위해서는 근골격계 질환을 유발할 수 있는 작업의 작업 부하(work load) 혹은 자세 부하(postural load)를 정확하게 평가할 수 있어야 한다.

근골격계질환의 유해요인을 평가하기 위한 연구는 상대적으로 객관적 접근이 가능한 작업 관련 요인의 정량화에 초점이 맞추어져 왔다. 작업 관련 요인의 부하 크기를 올바르게 평가하기 위해서는 강도(amplitude), 반복(repetitiveness), 지속 시간(duration) 등의 요소가 동시에 고려되어야 하나, 현재까지 이 분야에 대한 연구는 주로 강도 요인 중 자세 부하를 측정하는 데 집중되어 왔다. 자세 부하의 측정에는 OWAS(Karhu *et al.*, 1977), RULA(McAtamney and Corlett, 1993), REBA(Hignett and McAtamney, 2000) 등의 자세분류체계(posture classification scheme)가 주로 활용되고 있다. 현재까지 개발되어 사용되고 있는 대부분의 자세분류체계들에서는 자세 부하 이외의 요인, 즉 강도 요인 중 자세 부하 이외의 외부 부하(external load), 반복(repetitiveness), 지속 시간(duration) 요인은 반영되어 있지 않다. RULA와 REBA에는 반복과 지속 시간 요인이 간단하게 고려되어 있으나, 그 구간이 너무 크고 단순하여 실제 산업 현장에서 발생하는 부하를 제대로 반영하고 있지 못하다.

동작의 반복은 다른 위험 요인과 독립적으로도 상지 질환에 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있으며(Colombini, 1998; Kwon and You, 2003; Silverstein *et al.*, 1987), Kuorinka and Forcier(1995)는 상지의 반복 동작이 근골격계질환을 유발하는 가장 중요한 위험 요인이라고 주장하였다. 동작의 반복에 대한 연구는 자세 부하와 같은 다른 분야의 연구에 비하여 많이 이루어지지 않았으며, 작업 특성에 따른 최대 허용 반복수(maximum acceptable frequency)의 결정(Dahalan and Fernandez, 1993; Kim and Fernandez, 1993; Marley and Fernandez, 1995), 동작의 반복이 부하에 미치는 영향에 대한 연구(Lin and Radwin, 1997, 1998), 동작 반복의 위험성을 판단하는 기준의 제시에 관한 연구(Carey and Gallwey, 2002; Hansson *et al.*, 2000; Rodgers, 1986; Silverstein *et al.*, 1986) 등으로 대별할 수 있다. 여러 연구자들이 동작의 반복성에 대한 기준을 제시하고 있으나, 동작 반복의 위험성을 평가하는 기준이 연구에 따라 각기 다른 문제가 있다. 예를 들어, 보통 수준의 반복을 Carey and Gallwey(2002), Yen and Radwin(2000)은 분당 10-20회, Hansson *et al.*(2000)은 분당 17-32회로 들고 있으며, Silverstein *et al.*(1987)은 광범위한 문헌 조사를 통하여 사이클 시간(cycle time)이 30초보다 작은 지 큰지를 기준으로 반복 수준의 높고 낮음을 결정하고 있다. 또한 반복에 대한 연구는 주로 손목 동작에 집중되어 있으며(Kwon and You, 2003), 팔꿈치나 어깨를 회전축으로 하는 팔동작에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 위에서 언급한 기존 연구들의 한계를 극복하기 위하여 팔 동작, 외부 부하, 동작의 반복 정도를 실험 변수로 하는 심물리학적 실험을 수행하여, 외부 부하와 팔

동작의 반복에 따른 부하를 정량적으로 측정·제시하고자 한다. 본 연구의 결과는 근골격계질환 예방을 위한 작업지침 마련의 기초 자료로, 그리고 외부 부하와 반복에 따른 부하를 고려한 새로운 자세분류체계 개발의 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 방법

2.1 피실험자

본 연구의 외부 부하, 팔 동작의 반복, 팔 동작에 따른 부하를 측정하는 심물리학적 실험에는, 과거 근골격계질환의 병력이 없는 건강한 남자 대학생 15명이 피실험자로 참여하였다. 이들의 연령, 신장, 체중의 평균과 표준편차는 다음과 같다: 1) 연령: 26.1±0.8세; 2) 신장: 173.3±5.1cm; 3) 68.7±10.5kg. 모든 피실험자에게는 실험 전에 실험의 목적, 내용, 위험성을 설명하고 실험 참여에 대한 동의를 받았으며, 실험 참여 시간에 대한 수당을 지불하였다.

2.2 실험 계획

본 연구의 실험에서는 팔 동작, 동작의 반복, 외부 부하를 실험 변수로 하였으며, 이들의 조합에 따른 주관적 불편도를 종속변수로 하였다. 팔 동작은 팔꿈치와 어깨의 동작으로 조절되었으며, 손목은 중립 자세, 즉 아래 팔(forearm)과 손이 일직선이 되도록 유지한 채 실험을 수행하였다. 각 변수의 내용 및 수준은 다음 <표 1>에 나와 있다. 팔꿈치 동작은 RULA에서 팔꿈치의 굴곡을 60-100°와 이외의 구간의 두 구간으로 나누고 있어, 이를 반영하여 60-100° 내외 이의 바깥 구간으로 나누어 변수의 수준을 정하였다. 어깨 동작은 굴곡과 외전의 두 동작으로 조절되며, 4가지 어깨 동작이 실험에 사용되었다. 즉, 어깨 동작굴곡과 외전 각각 2수준이 조합되어 총 4수준이 된다. 산업 현장의 반복적인 작업에서 매우 거북하거나(awkward) 부자연스러운 자세는 많이 일어나지 않으므로, RULA, REBA, LUBA(Kee and Karwowski, 2001)의 어깨 동작 분류에서 중간 정도의 부하를 가지는 정도로 변수들의 수준을 결정하였다. 그리고, 동작의 수준은 기존의 자세분류체계에서 많이 사용되고, 구분하기 쉬운 각도로 하였다.

Carey and Gallwey(2002)는 예비실험을 통하여 5분 동안 분당 20회 정도 손목을 구부리는 반복 실험에는 MVC(Maximum Voluntary Contraction)의 약 20% 정도가 피실험자들이 받아들이는 최대 허용 한도임을 밝히고, 이를 실험 계획에 사용하였다. 그러나, 본 실험은 Carey and Gallwey(2002)의 실험보다 동작의 반복이 많기 때문에, 이보다 낮은 최대 손 힘(maximum static hand force)의 10%를 최대로 하며, 예비 실험을 통하여 피실험자들이 본 실험 처치(treatment)를 무리 없이 수행할 수 있는 정

도로 외부 부하의 수준을 정하였다. 최대 손 힘은 Van Cott and Kinkade (1972)의 수직 방향으로의 힘 자료를 사용하였다. 산업 현장에서 분당 10-20회의 반복 동작이 전형적으로 일어난다는 Carey and Gallwey(2002)의 연구 결과를 바탕으로, 이를 중심으로 앞뒤로 반복 수준이 정의되도록 팔 동작의 반복 수준을 결정하였다. 팔 동작의 반복은 팔꿈치를 중립 자세(굴곡이 0°인 자세)에서 <표 1>에 나와 있는 수준만큼 굴곡하였다 중립 자세로 돌아가는 것으로 정의하였다.

<표 1>에서와 같은 변수와 수준에 대하여 완전요인 계획법(full factorial design)으로 실험을 계획하면, 피실험자당 256회의 실험을 하게 되어 실험의 크기가 커지므로 실험에 많은 시간이 소요되는 현실적인 문제가 발생한다. 또한, 피실험자에게 256개의 실험 처치에 대한 주관적 평가를 하게 하는 것은 부하가 커 실험의 정도(精度)에도 영향을 미치므로, 본 연구에서는 L16 직교배열표(orthogonal array)를 이용하여 실험의 크기를 줄였다. 기존 연구에서 자세, 힘의 크기, 동작 반복의 수준 등은 유의한 교호 작용이 발견되지 않고 있어 (Carey and Gallwey, 2002; Lin and Radwin, 1998), 본 연구에서도 이를 따라 L16 직교배열표에 주효과(main effect)만 배열하였다.

표 1. 실험 변수와 수준

실험 변수	수 준
팔꿈치	굴곡 30°, 60°, 90°, 120°
어깨	굴곡 0°, 60°, 외전 0°, 60°
반복	5, 10, 20, 30회/분
외부 부하	0, 1, 3, 5kg

2.3 실험 절차

실험은 크게 준비 단계, calibration test, 본(main) 실험, verbal category의 측정 등의 4단계로 구성되었다. 준비 단계에서는 피실험자들에게 실험의 목적, 내용, 실험 과정에 나타날 수 있는 위험 요인을 설명하고, 실험 참여에 대한 동의를 구하였다. calibration test에서는 본 실험에서 각 실험 처치에 대한 부하 측정 시 사용하고자 하는 magnitude estimation을 수행할 능력이 있는지를 검증하였다. 검증에서는 선(line)으로 된 10개의 자극을 제시하고 이에 대한 지각의 강도를 숫자로 답하게 하고, 자극과 응답의 크기를 로그(log) 변환하여 이들에 대한 선형회귀 분석을 실시하여 기율기의 99% 신뢰 구간에 1.0이 포함되는지를 확인하였다. 1.0은 선(line) 자극에 대하여 숫자로 올바르게 평가할 경우의 기율기이며(Gescheider, 1985), 기율기의 99% 신뢰 구간에 이 값이 포함되지 않으면 magnitude estimation을 수행할 능력이 없는 것으로 판정하였다. 본 연구에서는 18명의 피실험자가 calibration test에 참여하여, 15명이 이를 통과하여 본 실험에 참여하였다.

본 실험에서는 <표 1>의 변수와 수준에 따른 실험 처치에 따라 부하를 magnitude estimation으로 측정하였다. magnitude estimation의 여러 기법 중 피실험자의 응답에 어떠한 기준도 주지 않고 피실험자 자신의 척도(scale)로 응답하게 하는 free modulus method와, 자극에 대하여 자신의 지각의 크기를 숫자로 응답하게 하는 numeric estimate 방법을 사용하였다. magnitude estimation은 심물리학적 실험에서 많이 사용하는 category scaling과 달리, 피실험자들의 응답이 구간(interval) 혹은 비율 척도(ratio scale)의 특성을 가지고 있어 다양한 정량적 통계 분석이 가능한 장점이 있다.

실험자가 고니오미터(goniometer)를 이용하여 실험 처치에 따른 관절 동작의 정도를 관절의 회전점에 표시를 하면, 피실험자는 이에 맞는 자세를 취한다. 어깨 굴곡, 어깨 외전, 팔꿈치 굴곡의 순서로 피실험자가 자세를 취하도록 하였다. 실험자는 본 실험을 위하여 제작된 2개 철제봉의 지시봉 끝이 손의 중심 부분과 팔꿈치 관절을 향하도록 철제봉 지시봉의 높이를 각각 조절한다. 이는 팔꿈치 동작 반복의 목표(target)점을 표시하기 위한 것이다. 팔꿈치, 어깨 외의 신체 부위는 중립 자세를 취하며, 실험은 선 자세에서 이루어진다. 다음으로 어깨는 현 수준에서 유지한 채 팔꿈치 굴곡각이 0°가 되도록 팔을 펴게 하고, 높낮이 조절 가능한 탁자를 손 높이와 같게 조절하여 손을 탁자 위에 놓게 하고 외부 부하를 손에 쥐어준다. 실험 시작 벨 소리와 함께 실험을 시작하며, 실험 처치의 팔꿈치 굴곡각에 맞게 조절하여 놓은 지시봉의 높이까지 팔꿈치를 굴곡하였다 중립 자세(팔꿈치 굴곡이 0°임)로 돌아와 손과 외부 부하를 탁자 위에 올려놓는다. 이러한 과정을 주어진 반복 횟수만큼 5분 동안 반복한다. 동작의 반복은 visual basic으로 된 프로그램으로 PC에서 ‘삐’ 하는 소리로 조절하였다.

실험 처치는 각 피실험자별로 임의의 순서로 제시되었으며, 실험 시작 전에 5회의 연습 과정을 두었다. 각 실험 사이에는 5분 이상의 휴식 시간을 주었으며, 실험 도중 상해의 위험을 느낄 때는 언제든지 실험을 중단할 수 있음을 주시시켰다. 실험은 8회씩 2일에 걸쳐 수행되었으며, 2일째 실험 전에 전날의 평가 결과를 보여 주어 전 실험의 기억을 되살려 실험에 임하도록 하였다.

마지막으로 본 실험이 끝난 직후 다음의 9개 verbal category에 대하여 본 실험에서 사용한 척도를 사용하여, 각 verbal category에 상응하는 불편의 크기를 평가하게 하였다: 극히 불편, 매우 불편, 불편, 약간 불편, 보통, 약간 편함, 편함, 매우 편함, 극히 편함. 이러한 verbal category는 본 실험에서 숫자로 나타내진 불편 수준을 일상 생활에서 사용하는 쉬운 의미의 용어로 해석할 수 있게 한다.

3. 결 과

본 연구의 실험에서는 각 실험 처치에 대한 부하를 측정하기

위하여 magnitude estimation 중 free modulus method를 채택하였기 때문에, 각 피실험자마다 평가 시, 각기 다른 척도를 사용하였다. 따라서, 분석 전에 모든 피실험자가 같은 척도를 가지도록 하는 자료의 변환 과정이 필요하다. 본 연구에서는 다음과 같은 식을 이용하여 자료를 정규화(normalization)하였다.

$$\text{정규화 불편도} = \frac{\text{raw data} - \text{최소 불편도}}{\text{최대 불편도} - \text{최소 불편도}} \times 100$$

여기서, 최소 불편도와 최대 불편도는 각 피실험자별 최소 및 최대 불편도를 말한다. 위의 정규화 과정은 각 피실험자별로 수행하며, 15명 피실험자에 대한 각 실험 처치의 평균값이 다음의 분석에 사용되었다.

3.1 분산 분석

실험 변수의 유의성을 검정하기 위하여 분산 분석을 실시하였으며, 그 결과는 다음 <표 2>에 나와 있다. 표에서 보는 바와 같이 외부 부하는 유의 수준 1%에서, 동작의 반복은 유의 수준 5%에서, 어깨 동작은 유의 수준 10%에서 지각 불편도에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 팔꿈치 동작은 유의한 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다. 외부 부하의 영향의 정도가 어깨 동작, 동작의 반복에 비하여 매우 큼을 보이고 있다.

표 2. 분산 분석 결과

실험 변수	자유도	Mean square	F value
외부 부하	3	3488.15	56.34***
반복	3	1541.75	24.90**
어깨 동작	3	475.16	7.68*
팔꿈치 동작	3	72.66	1.17
Error	3	61.91	

*: significant at $\alpha=0.10$, **: significant at $\alpha=0.05$, ***: significant at $\alpha=0.01$.

3.2 외부 부하

외부 부하의 크기에 따른 지각 불편도는 <그림 1>에 나와 있으며, 외부 부하의 크기가 증가함에 따라 지각 불편도는 선형적으로 증가함을 보였다 ($R^2: 0.98$). 회귀 분석에서도 기울기가 크게 나타나 분산 분석에서와 같이 외부 부하의 영향이 큼을 볼 수 있다.

3.3 동작의 반복

팔꿈치 굴곡 동작의 반복 횟수가 많아질수록 지각 불편도가 선형적으로 증가하는 추세를 보였으며(<그림 2>), 회귀식의 기울기를 볼 때 외부 부하에 비하여 그 영향의 크기가 작음을

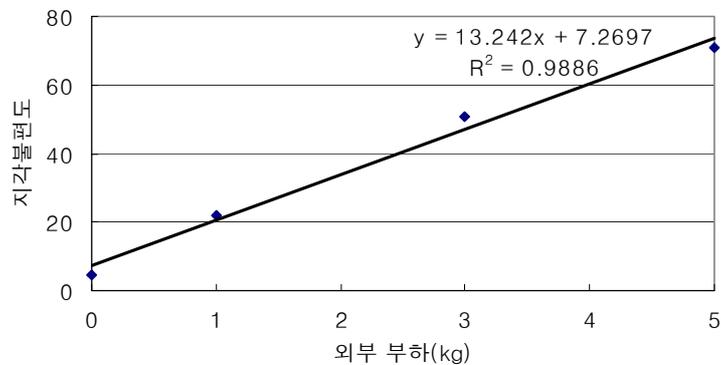


그림 1. 외부 부하에 따른 지각 불편도.

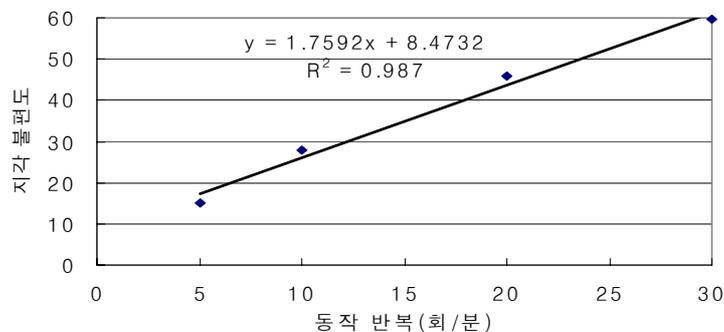


그림 2. 동작의 반복에 따른 지각 불편도.

알 수 있다.

3.4 어깨 동작의 영향

어깨 관절은 굴곡과 외전 각각 2수준에서 불편도를 측정하였으며, 어깨 동작에 따른 지각 불편도는 <그림 3>에 나와 있다. 중립 자세에서 굴곡과 외전 동작이 각각 발생하면 지각 불편도가 크게 증가하다, 2 동작이 동시에 일어나면 감소하는 추세를 보였다.

3.5 verbal category

9개의 verbal category에 대한 평가 결과는 다음 그림 4에 나와 있으며, ‘극히 편함’에서 ‘극히 불편함’으로 갈수록 불편의 수준이 선형 혹은 이차함수의 형태로 증가함을 보이고 있다. verbal category의 구간별 간격은 불편 쪽으로 갈수록 커짐을 알 수 있으며, 이러한 verbal category는 그 의미에 따라 다음의 3 영역으로 구분할 수 있다.

- 1) 안락 영역: verbal category가 ‘보통’에서 ‘편함’ 쪽으로 평가 되는 영역 혹은 불편 수준이 38.0보다 작은 영역
- 2) 불편 영역: verbal category가 ‘약간 불편’과 ‘불편’에 해당하는 영역 혹은 불편 수준이 38.0보다 크고 81.0보다 작은 영

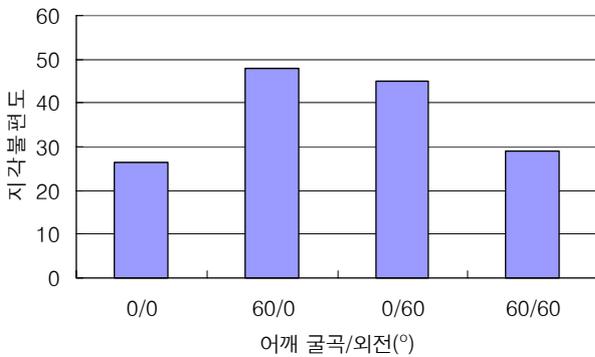


그림 3. 어깨 동작에 따른 지각 불편도.

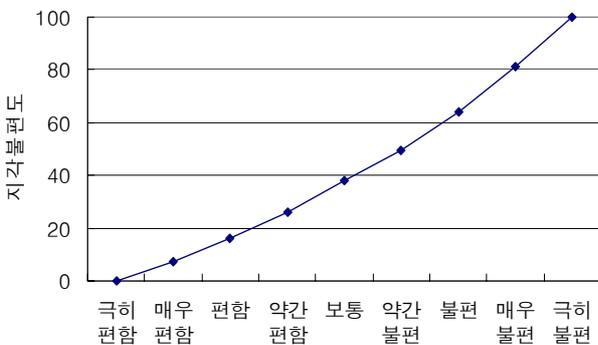


그림 4. verbal category에 따른 지각 불편도.

역으로 주관적 부하가 커 개선이 요구되는 영역

- 3) 매우 불편 영역: verbal category가 ‘매우 불편’과 ‘극히 불편’에 해당하는 영역 혹은 불편 수준이 81.0보다 큰 영역으로 주관적 부하가 매우 커 개선이 시급히 요구되는 영역

3.6 외부 부하와 동작의 반복에 따른 지각 불편도

팔꿈치와 어깨 동작의 영향은 외부 부하와 동작의 반복 요인에 비하여 작으므로, 이를 제외한 외부 부하와 동작 반복에 따른 지각 불편도를 알아보기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다. 회귀식은 다음과 같으며, R² 값은 0.88로 매우 높게 나타났다.

$$\text{지각 불편도} = -21.31 + 1.76 * \text{동작 반복(회/분)} + 13.24 * \text{외부 부하(kg)}$$

위의 회귀식을 이용하여 외부 부하와 동작 반복 수준에 대한 등편의(isocomfort) 조합, 즉 불편 혹은 편함의 수준이 같은 조합을 구하였다 (<그림 5>). 예를 들어, 5회 반복/3.8kg의 외부 부하 조합과 30회 반복/0.5kg의 외부 부하 조합은 같은 ‘보통’ 수준의 불편도를 가진다. 9개 verbal category 중 ‘극히 불편’에 대해서는 본 연구의 실험에서 설정한 외부 부하와 반복의 범위 내에는 존재하지 않았으며, ‘보통’에서 ‘불편함’이나 ‘편함’ 쪽으로 verbal category가 이동할수록 등편의 조합 수가 줄어들고 있다.

실험에서 사용된 동작 반복과 외부 부하 수준의 조합에 대하여 위의 회귀식을 이용하여, 불편 수준을 계산함으로써 상대적 부하를 설정하였다(<표 3>). 상대적 부하는 불편도가 최소값을 가지는 5회 반복/외부 부하가 없는 실험 처치의 불편도를 1로 하고, 다른 실험 변수 수준의 조합에 대한 불편은 최소 불편 수준에 대한 상대적인 비율로 계산하였다. 상대적 부하는 비율 척도의 특성을 가지게 되어 실험 처치 간 불편 수준을 직접 비교할 수 있게 해 준다. 예를 들어, 30회 반복/외부 부하 5kg의 조건은 외부 부하 없이 분당 5회 팔 동작을 반복하는 것에 비하여 부하가 9배에 이릅니다. 상대적 부하의 계산

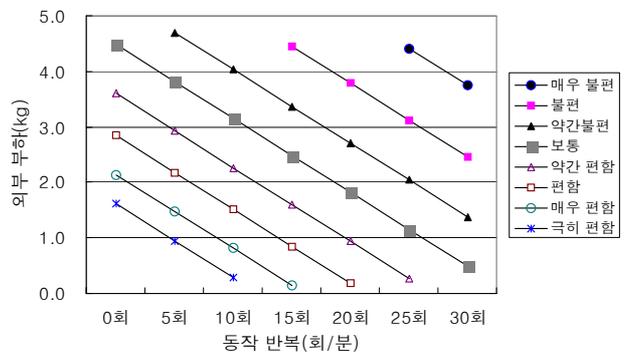


그림 5. 외부 부하와 동작 반복에 대한 등편의 조합.

은 <그림 6>의 방식을 이용하여도 같은 결과를 얻을 수 있다. 16개 실험 처치에 대한 실제 실험에 의해 구한 불편 수준과 예측 부하는 <그림 7>에 나와 있으며, 그림에서 기울기가 1.0에 가깝고 R² 값이 약 0.88로 커 <그림 6>에서 제시한 방식으로 구한 상대적 부하는 실험에서 얻어진 실제 부하(최소 불편 수준에 대한 비율로 변환한 것임)를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

위에서 제시한 verbal category 분류를 상대적 부하 개념으로 나타내면 다음과 같으며, <표 3>에서 진하게 칠하여진 부분은 ‘매우 불편’, 연한 회색으로 된 부분은 ‘불편 영역’, 나머지 부분은 ‘안락 영역’에 속한다.

- 1) 안락 영역: 상대적 부하가 3 이하인 영역
- 2) 불편 영역: 상대적 부하가 3보다 크고 6 이하인 영역
- 3) 매우 불편: 상대적 부하가 6보다 큰 영역

표 3. 외부 부하와 동작 반복에 따른 상대적 부하

동작반복 (회/분)	외부 부하(kg)			
	0	1	3	5
5	1*/1**	2/2	4/2	6/4
10	2/1	3/2	5/4	7/5
20	3/1	4/3	6/6	8/8
30	4/2	5/4	7/8	9/9

*: 회귀식에 의해 예측된 부하, **: 실제 부하



그림 6. 상대적 부하 예측.

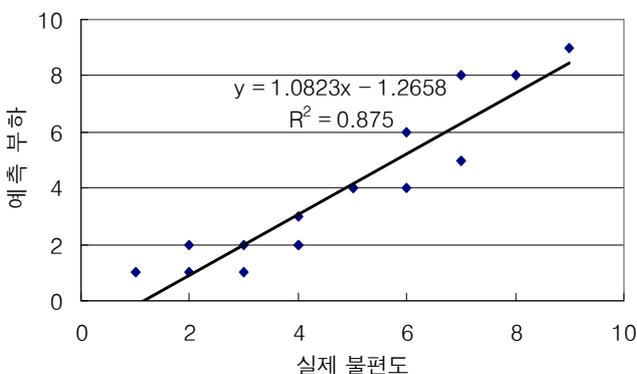


그림 7. 실제 불편 수준과 예측 부하.

4. 토 의

분산 분석에서 실험 변수 중 외부 부하의 영향이 가장 크고, 다음으로 동작의 반복이 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 동작 반복 수준에 관계없이 힘(force)의 수준만 고려할 때 누적외상성질환(cumulative trauma disorder)의 발병률(odds ratio)이 4.4였으나, 힘의 크기에 관계없이 동작 반복의 수준만 고려할 때 누적외상성질환의 발병률이 2.8로 낮아짐을 보여, 힘의 영향이 동작 반복에 비하여 큼을 보인 Silverstein *et al.*(1986)의 연구 결과와 일치한다. 또한, Silverstein *et al.*(1987)의 연구에서 낮은 반복과 작은 힘을 요하는 작업에 노출된 작업자군에 비하여 높은 반복과 큰 힘을 요하는 작업에 노출된 작업자의 누적외상성질환의 발병률이 5배 이상에 이르러, 동작의 반복과 힘 요인이 누적외상성질환, 즉 근골격계질환의 발병에 큰 영향을 미침을 보이고 있다.

산업 현장에서 근골격계질환의 위험 요인을 평가하기 위하여 많이 사용되고 있는 자세분류체계인 OWAS에는 동작 반복 요인은 반영되어 있지 않으며, 외부 부하는 반영되어 있으나 <표 4>에서 보는 바와 같이 그 구간이 커 실제 산업 현장에서 일어나고 있는 인력 운반 작업의 중량물에 의한 부하를 제대로 반영하지 못한다. RULA와 REBA에서는 OWAS에서 비하여 외부 부하를 세분하여 고려하고 있으나(<표 4>), 2kg, 5kg, 10kg 등을 구간의 경계로 하고 있어 1-2kg의 차이에도 불편도가 크게 차이를 보인 본 연구의 결과와 비교할 때 구간을 나누는 기준이 적절하지 못하다 할 수 있다. 그리고, RULA와 REBA에서는 분당 4회 반복을 기준으로 동작 반복 요인을 고려하고 있으나 (<표 4>), 팔 동작의 반복이 지각 불편도에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타난 본 연구의 결과와 반복 요소를 다른 기준 연구(Carey and Galloway, 2002; Hansson *et al.*, 2000; Rodgers, 1986; Silverstein *et al.*, 1986)의 결과를 고려할 때, 동작 반복의 기준(4회/분)이 낮고 분류 구간 수가 적어 반복에 의한 영향을 제대로 반영한다고 하기는 어렵다.

표 4. OWAS, RULA, REBA의 외부 부하, 동작 반복 요인

	외부 부하	동작 반복
OWAS	0-10kg 미만, 10-20kg 미만, 20kg 이상	반영되어 있지 않음
RULA	0-2kg 미만, 2-10kg의 단속적 부하, 2-10kg의 정적 부하 혹은 2-10kg의 반복적 부하, 10kg 이상의 부하 혹은 shock나 갑작스런 힘	분당 4회 이상 반복
REBA	0-5kg 미만, 5-10kg 이하, 10kg 초과, shock나 갑작스런 힘	분당 4회 이상 반복

외부 부하와 동작 반복 수준에 따른 등편 조합의 개념(<그림 5>)을 이용하면, 두 변수가 지각 불편도에 미치는 영향의 상대적 크기를 쉽게 예측할 수 있다. 또한, <표 3>에 두 변수의 조합에 대한 상대적 부하의 크기를 예측할 수 있는 식을 제시하여, 서로 다른 작업 간의 부하를 쉽게 비교할 수 있게 하였다. 이러한 본 연구의 결과는 산업 현장에서 일어나는 작업 부하를 올바르게 평가할 수 있게 할 뿐만 아니라, 평가에서 부하의 크기가 문제가 될 때 외부 부하와 동작 반복 중 어느 요인을 얼마나 줄여야 하는가에 대한 방향을 제시하여 적절한 부하를 가진 작업의 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

<그림 3>의 어깨 동작에 따른 지각 불편도에서 어깨 굴곡/외전이 60°/0°, 0°/60°에 비하여, 60°/60°일 때가 오히려 지각 불편도가 작게 나타났다. 기존의 자세 분류 체계를 이용할 때 여러 자유도(degree of freedom) 동작이 동시에 일어날 경우 각각의 자유도 동작에 비하여 부하가 더 커지는 것에 비하여, 본 연구의 이러한 결과는 차이를 보인 것이라 할 수 있다. 이는 현재까지의 자세분류체계는 2 자유도 이상의 동작이 동시에 일어날 때의 교호 작용을 고려하지 않고 동작들을 독립적으로만 고려하였기 때문이라 판단된다.

이러한 교호 작용의 이유로는 굴곡 혹은 외전 동작 중 어느 한쪽 동작만을 취한 상태에서 팔꿈치 굴곡 동작을 반복할 때 몸통에 의한 간섭이 일어날 수 있고, 어깨 굴곡 동작 없이 외전 동작만 있는 상태에서는 팔꿈치 굴곡 동작을 취할 때 피실험자들이 불편을 크게 느끼기 때문이라는 것 등을 들 수 있다. 이는 어깨 외전과 팔꿈치 굴곡에 동원되는 근육의 작용 방향의 차이 등 때문인 것으로 판단된다. 또한, 본 연구의 이와 같은 결과는 동작경계원칙에서 손과 신체의 동작을 동작 신체 부위에 따라 5가지 동작등급으로 나누고, 가능한 범위 내에서 낮은 동작등급을 사용할 것을 권장하고 있으나, 손가락이나 손만의 동작(동작등급 1 혹은 2)에 비하여 다른 신체 부위에 의한 간섭이 작고 시각적 파악이 쉬운 팔꿈치에 의한 동작등급 3이 덜 피로하며 보다 정확함을 보인 것과 일치한다 할 수 있다 (Niebel and Freivalds, 1999).

5. 결 론

본 연구에서는 외부 부하, 동작 반복, 팔 동작 등을 실험 변수로 하는 실험을 수행하여, 이들 요인들이 지각 불편도에 미치는 영향의 크기를 정량화하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 현재까지의 많은 연구가 부하의 3요소 -강도, 반복, 지속시간-중 주로 강도에 해당하는 자세 부하에 집중되어 왔으나, 본 연구는 강도 요인 중 외부 부하를 추가하고 동작의 반복을 다루는 등 기존 연구에 비하여 진일보한 것이라 할 수 있다. 본 연구의 결과는 작업 현장에서 일어나는 작업의 부하를 올바르게 평가하고 이해하는 데 도움이 될 뿐만 아니라, OWAS, RULA, REBA 등의 자세분류체계들에서 소홀히 다루어지고 있는 외부 부하,

동작 반복의 효과를 개선한 새로운 자세분류체계의 개발에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Carey, E.J. and Gallwey, T.J. (2002), Effects of wrist posture, pace and exertion on discomfort, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29, 85-94.
- Colombini, D. (1998), An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs, *Ergonomics*, 41(9), 1261-1289.
- Dahalan, J.B. and Fernandez, J.E. (1993), Psychophysical frequency for a gripping task, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 12, 219-230.
- Gescheider, G.A. (1985), *Psychophysics: method, theory, and application*, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey.
- Hagberg, M., Silverstein, B., Wells, R., Smith, M.J., Hendrick, H.W., Carayon, P. and Perusse, M. (1995), *Work related musculoskeletal disorders (WMSDs)*, Taylor & Francis, London.
- Hansson, G.A., Balogh, I., Ohlsson, K., Palsson, B., Rylander, L. and Skerfving, S. (2000), Impact of physical exposure on neck and upper limb disorders in female workers, *Applied Ergonomics*, 31, 301-310.
- Hignett, S. and McAtamney, L. (2000), Rapid entire body assessment(REBA), *Applied Ergonomics*, 31, 201-205.
- Karhu, O., Kansu, P. and Kuorinka, I. (1977), Correcting working postures in industry: a practical method for analysis, *Applied Ergonomics*, 8(4), 199-2001.
- Kim, C-H. and Fernandez, J.E. (1993), Psychophysical frequency for a drilling task, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 12, 209-218.
- Kuorinka, I. and Forcier, L. (1995), *Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs): A reference book for prevention*, Taylor and Francis, London.
- Kwon, O. C. and You, H-C. (2003), A survey of repetitiveness assessment methodologies for hand-intensive tasks, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 22(3), 75-91.
- Lin, M.L. and Radwin, R.G. (1997), A single metric for quantifying biomechanical stress in repetitive motions and exertions, *Ergonomics*, 40(5), 543-558.
- Lin, M.L. and Radwin, R.G. (1998), Agreement between a frequency-weighted filter for continuous biomechanical measurements of repetitive wrist flexion against a load and published psychophysical data, *Ergonomics*, 41(4), 459-475.
- Marley, R.J. and Fernandez, J.E. (1995), Psychophysical frequency and sustained exertion at varying wrist postures for a drilling task, *Ergonomics*, 38(2), 303-325.
- McAtamney, L. and Corlett, E.N. (1993), RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, *Applied Ergonomics*, 24(2), 91-99.
- Ministry of Labor (2003), Statistics of industrial accidents of 2002.
- Niebel, B. and Freivalds, A. (1999), *Methods standards & work design*, McGraw-Hill, Seoul.
- Rodgers, S. (1986), *Ergonomic design for people at work*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Silverstein, B.A., Fine, L.J. and Armstrong, T.J. (1986), Hand wrist cumulative trauma disorders in industry, *British Journal of Industrial Medicine*, 43, 779-784.
- Van Cott, H.P. and Kinkade, R.G. (1972), *Human engineering guide to equipment design*, American Institute for Research, Washington, D.C.

Winkel, J. and Mathiassen, S.E. (1994), Assessment of physical work load in epidemiological studies: concepts, issues and operational considerations, *Ergonomics*, 37(6), 979-988.



기도형

서울대학교 산업공학과 학사
서울대학교 산업공학과 석사
포항공과대학교 산업공학과 박사
현재: 계명대학교 산업시스템공학과 부교수
관심분야: 자세부하, 근골격계질환 예방
프로그램, 감성공학