

# 손목 자세와 외부 부하에 따른 손목 불편도 모델링

최광수\* · 박재규\* · 정의승\* · 최재호\*\*

## Modeling of Wrist Discomfort with External Loads

Kwangsoo Choi\*, Jaekyu Park\*, Eui S. Jung\*, Jaeho Choe\*\*

### ABSTRACT

The objectives of this study are to analyze representative wrist postures while using hand tools and parts at general assembly processes, to evaluate perceived discomfort on the wrist when external loads are present, and to suggest an evaluation and prediction model of perceived discomfort. Sixteen subjects participated in an experiment to appraise perceived discomfort. Three types of the wrist postures with five levels of non-neutralities were analyzed when five levels of external load were applied to each posture. The ANOVA results showed that the perceived discomfort of wrist postures was significantly affected by both the wrist posture and external load ( $p < 0.001$ ). It was also shown that some of the interactions between external loads and the wrist postures (Flexion/Extension\*Load, Flexion/Extension\*supination/pronation, ulnar/radial deviation\*supination/pronation) were significant ( $p < 0.001$ ). The result implies that a new posture classification scheme for workload assessment methods may be needed to reflect such effects of external load and wrist posture. A regression model of perceived discomfort was developed with respect to wrist posture and external load from the experimental data. A subsequent experiment revealed that the correlation coefficient between the predicted values of perceived discomfort from the model and the actual values obtained from the experiment was about 0.98. It is expected that the results help to properly estimate the body stress resulting from worker's postures and external loads and can be used as a valuable design guideline to analyze potential hazard of musculoskeletal diseases in industry.

Keyword: Wrist, External load, Discomfort

### 1. 서 론

최근 우리나라의 산업 현장에서 가장 문제시 되고 있는 작업 관련성 질환 중 하나가 근골격계질환이다. 특히 산업 환경의 변화에 따른 단순 반복 작업 및 반자동화에 의한 작업의 부담이 커지면서 근골격계질환이 사회적 문제가 되고 있다. 근골격계질환이란 반복적인 동작, 부적합한 자세, 무리한 힘의 사용, 날카로운 면과의 신체접촉, 진동 및 온도 등의

요인에 의하여 발생하는 건강장해로서 목, 어깨, 허리, 상지 및 하지의 신경, 근육 및 그 주변의 신체조직 등에 나타나는 질환을 일컫는다(노동부, 2004). 이러한 근골격계질환은 누적외상성질환(Cumulative Trauma Disorders: CTDs), 즉 신체의 반복적인 질환이나 과도한 움직임으로 인한 질병이며, 누적외상성질환을 비롯한 손목과 관련된 대부분의 산업 재해는 동작 시 과도한 힘의 사용이나 극단적인 관절의 움직임, 그리고 동일한 동작의 잦은 반복 등에 그 원인이 있다(Cannon et al., 1981; Putz-Anderson, Vern., 1988). 또한

\*고려대학교 산업시스템정보공학과, \*\*대전대학교 산업시스템공학과  
교신저자: 정의승

주 소: 136-701 서울시 성북구 안암동 5가 1번지, 전화: 02-3290-3391, E-mail: ejung@korea.ac.kr

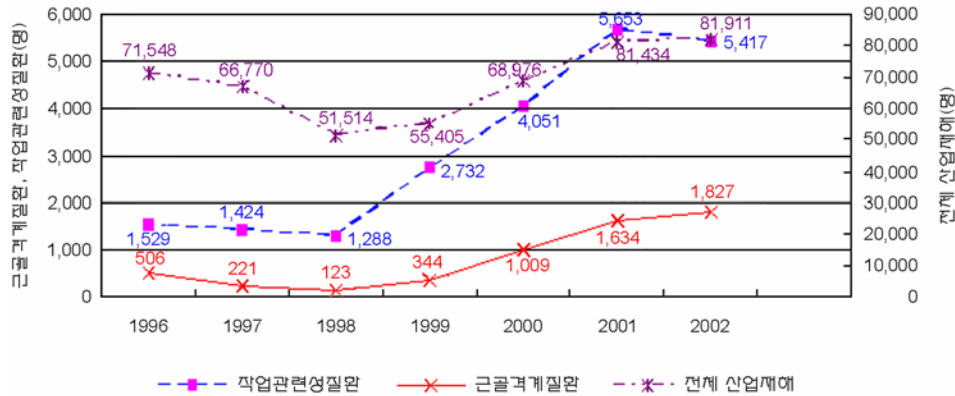


그림 1. 산업재해 발생 현황

특정한 신체 부위의 반복 작업과 불편하고 부자연스러운 작업 자세, 강한 노동 강도, 작업 시 요구되는 힘, 불충분한 휴식, 손과 팔 부위에 작용되는 과도한 진동 등이 원인이 되어 목, 어깨, 팔꿈치, 손목, 손가락, 허리, 다리 등 주로 관절 부위를 중심으로 근육과 혈관, 신경 등에 미세한 손상이 생겨 결국 통증과 감각이상을 호소하는 근골격계질환의 만성적인 건강장해로 알려져 있다(Edil, 1997; ANSI, 1996; NIOSH, 1997).

미국의 노동부 산하 노동 통계청의 1992년부터 2002년까지의 근골격계질환 현황에 대한 보고에 의하면 산업재해의 수는 점차 줄어드는 추세이지만 산업재해에서 근골격계질환이 차지하는 비율은 약 34%로 지속적으로 비슷한 수준을 이루고 있다(The Bureau of Labor Statistics, 2004). 또한 그림 1의 산업재해 발생 현황에서 볼 수 있듯이 우리나라의 경우에 있어서도 전체 산업재해와 작업관련성질환의 발생 건수는 2001년 이후 일정 수준으로 지속되는 반면 직업성 근골격계질환은 그 숫자가 매년 증가하는 추세로 전체 직업병 환자 중 차지하는 비율이 점점 높아지고 있다(한국산업안전공단, 2003).

특히 여러 산업분야에서 자동화가 급속히 증가하고 있음에도 불구하고, 아직까지도 산업 현장 및 일상생활에서의 작업 중 수작업이 차지하는 비율은 매우 높다. 실제로 스웨덴의 통계에 따르면 직업성 상해에서 손가락, 손, 손목이 포함된 사고가 32%에 달한다고 한다(Mital and Kilbom, 1992). 또한 미국의 경우, 전체 작업자의 약 90%가 수공구를 이용한 수작업에 의존하고 있으며, 다른 산업에 비해 상대적으로 많은 자동화가 이루어진 로보틱스(Robotics)나 가상현실(VR Technology) 분야에서도 수작업에 관련된 부분이 70%가 넘는 것으로 알려져 수작업 관련 작업 관련성 질환의 발생 가능성은 여전히 높다고 할 수 있다(Yun, 1994).

국내의 경우 중량물 취급이 많은 자동차 조립 공정에서 자각증상에 의한 근골격계질환 의심자(호소율)를 살펴보면

손목 관련 증상호소율이 라인 작업에서 40.5%, 비라인 작업에서 21.0%로 손목 관련 근골격계질환의 발생 가능성이 매우 높다고 할 수 있다(현수돈 등, 2002).

이러한 수작업을 수행하는 산업 현장에서의 주요 관심사는 매년 높은 비율로 발생하는 손과 관련된 상해를 줄이는 것이며, 수작업과 관련된 기존의 연구는 이러한 작업 반복성에 대한 연구(Radwin and Lin, 1993; Radwin et al., 1994; 권오채, 윤명환, 1999)와 작업 자세에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 이것은 근골격계질환이 작업자의 실수 또는 사고에 기인하기 보다는 작업 방법 및 작업 환경 등의 부적절한 설계로 발생하는 경우가 많기 때문이며, 특히, 부적절한 작업 자세는 작업성 근골격계질환의 유발과 높은 상관관계를 가지므로, 부적절한 작업 자세를 개선하기 위해서는 부적절한 작업 자세로 인한 작업 부하를 평가하는 것이 선행되어야 한다(Bernard, 1997).

기존의 작업 자세의 평가 기법으로는 관찰적 기법, 장비를 이용한 직접 측정 기법, 그리고 설문에 의한 기법 등이 있으며, 이러한 기법들을 이용한 작업 자세의 연구는 많이 이루어졌다(Genaidy, et al., 1994; Winkel and Mathiassen, 1994; Li and Buckle, 1999). 또한 작업 자세에서의 외부 부하 및 작업 자세의 유지, 동작의 반복 등을 통한 연구가 진행되었으나 이러한 작업 자세의 연구는 허리 및 상지의 작업 자세에 대한 분석이 주를 이루며, 각 지체에 대한 연구는 부족한 실정이다.

그러나 이와 같은 수작업 즉, 실제 산업 현장에서 발생 가능한 손목 작업에 관한 연구가 필요하나 이에 대한 연구는 부족한 실정이며, 따라서 손목 자세 및 외부 부하로 인하여 발생 가능한 손목의 위험도를 평가할 수 있는 평가 기법은 부족한 실정이다(기도형, 2004a).

따라서 이러한 일반 산업 현장에서 발생 가능한 손목 작업의 위험성에 관한 연구를 위하여 본 연구에서는 일반적인 자동차 조립 공정을 대상으로 손목 작업의 유형과 자세 및 외

부 부하에 대한 기초 자료의 확보를 위해 아래와 같은 조사를 실시하였다.

일반적으로 자동차 생산 공정은 크게 경합금 및 주철 주조, 프레스, 플라스틱 생산, 엔진 생산, 조립, 도장, 생산 관리, 품질 관리 등의 부분으로 나누어진다. 본 연구에서는 자동차 생산 공정의 전체 공정을 대상으로 11개 근골격계 부담 작업(노동부, 2003)을 조사하였으며, 이 중 근골격계 부담 작업의 발생 건수가 가장 높은 조립 공정을 대상으로 손목 작업 자세 및 작업 시 사용하는 중량물을 조사하여 본 연구에 활용하도록 하였다.

본 연구에서는 이러한 실제 자동차 조립 공정에서 발생하는 손목의 대표적인 자세와 한손 부담 작업의 외부 부하 무게를 조사하여, 손목의 각 동작 별 무게 부담에 따른 심물리학적 부하를 평가하는 손목 불편도 모델을 제시하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 피실험자

본 연구는 지난 6개월간 근골격계질환 및 누적외상성질환의 병력이 없는 남자 16명의 대학생 및 대학원생(나이:  $25.1 \pm 2.6$ 세, 키:  $174 \pm 4.6$ cm, 몸무게:  $72.5 \pm 7.5$ kg)을 대상으로 실험을 실시하였다. 실험 참여는 피실험자들의 서면 동의를 통해 이루어졌으며, 실험 대상 적격 여부를 위한 기본 정보를 파악하기 위하여 설문지를 통해서 연령 및 과거 병력과 실험 당일의 건강 상태 등을 조사하였다.

### 2.2 실험 계획

본 실험은 손목의 각 자세와 무게 부담에 대한 정량적인 주관적 불편도 측정을 목적으로 하며, 독립 변수는 운동 방향에 따른 3가지 손목 자세 각각에 대하여 5수준으로 정의하였으며, 외부 부하 역시 5수준으로 정의하였다. 손목 자세는 굴곡(Flexion) 및 신전(Extension), 척골(Ulnar) 및 요골 편향(Radial deviation), 그리고 회내(Pronation) 및 회외(Supination)의 비틀림(Twist)으로 하였으며, 각각의 수준은 굴곡 및 신전은  $-45^\circ, -32^\circ, 0^\circ, 32^\circ, 45^\circ$  척골 및 요골 편향은  $-20^\circ, -14^\circ, 0^\circ, 14^\circ, 20^\circ$ , 그리고 비틀림은  $-80^\circ, -56^\circ, 0^\circ, 56^\circ, 80^\circ$ 의 5수준으로 하였다. 또한 외부 부하는 실험용 중량물의 무게를 달리하여 제공하였으며 그 수준은 각기 0kg, 1kg, 3.2kg, 5.5kg, 6.5kg의 무게로 하여, 각 독립 변수의 조합 수준에 따라 주관적 불편도를 측정하였으며, 3.1절의 정규화 과정을 거쳐 사용되었다.

위에서 정의한 손목 동작과 외부 부하는 실제 자동차 생산

공정을 분석한 결과와 기존 연구의 동작 범위를 바탕으로 선정하였다. 또한 서론에서 언급한 것과 같이 자동차 생산 공정중에서 근골격계질환의 가장 큰 발생 건수를 차지하는 조립 공정의 작업을 분석하여 실험에 필요한 자료를 수집하였다. 조립 공정은 크게 중량물 취급 작업과 수공구 사용 작업으로 나눌 수 있으며, 표 1의 253개 부담 작업 중 손목과 관련된 공정 수는 126개였다. 126개의 공정 중 한손 작업의 비율은 약 68%로 85개의 공정이 포함되어 있었다.

표 1. 부서별 근골격계 부담 작업 발생 비율

자동차 생산 공정	근골격계 부담 작업 발생 건수	비율
주조부	0	0%
프레스부	14	4%
플라스틱부	8	2%
엔진부	36	10%
구동부	5	1%
차체부	7	2%
조립부	253	74%
페인트부	17	5%
기타	1	0%
전체	344	100%

이러한 조립 공정의 손목 동작을 분석한 결과 손목 불편도에 영향을 미치는 변수로는 굴곡 및 신전, 요골 편향 및 척골 편향, 회내 및 회외의 자세 요인을 확인할 수 있었다. 이러한 자세 요인 중 회내 및 회외의 자세는 엄밀히 말하자면 팔꿈치의 동작으로 손목 자세라고 말할 수 없다. 그러나 회내 및 회외의 자세가 실제 작업 현장에서 빈번한 동작으로 확인됨에 따라 본 연구에서 추가하여 실험하도록 하였으며, 손목의 자세 불편도 범위에 포함하였다. 그림 2는 이러한 손목 동작 관련 작업의 예를 보여주고 있다.

외부 부하의 경우 양손 작업을 포함한 무게를 분석하여, 한손 작업일 경우 발생하는 모멘트(moment)를 계산하여 사용하였다. 각 작업에서 손바닥과 중량물의 무게 및 무게 중심점까지의 거리는 작업 현장의 실제 값을 측정하여 사용하였으며, 손목 각도의 측정은 촬영된 영상을 분석하여 사용하였다. 다음의 식 1은 손목 관절에서의 모멘트 계산 과정이다.

$$\text{모멘트} = \text{중량물의 무게} \times \text{손목 중심점에서 중량물의 무게 중심점까지 거리} \times 9.8m/s^2 \quad (1)$$

이러한 작업 분석의 모멘트 계산을 바탕으로 분석하였을 때 양손 작업의 경우 작업자가 다루는 최대 무게는 8.9kg이며, 한손 작업의 경우 최대 무게는 5.45kg이었다. Rohmert



그림 2. 대표적인 조립 공정의 예

(1973)는 최대 근력(Maximum Voluntary Contraction)은 최대 허용 근력의 약 80%에 해당한다고 밝혔으며, 따라서 본 연구에서는 5.45kg의 최대 허용 근력이라고 할 수 있는 6.5kg을 외부 부하의 최대 무게로 산정하였다.

또한 이러한 분석 결과와 함께 기존 연구를 참고하여 손목 동작의 동작 범위 및 수준을 결정하였다. 기존 연구는 Armstrong(1986), Genaidy(1993), McAtamney and Corlett(1993), Moore and Garg(1994), Ketola(2001), Hignett and McAtamney(2000), 기도형(1998)의 연구를 참조하였다. 표 2는 기존 연구의 손목 동작 범위 및 수준을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 실험 설계 시 각 독립 변수는 관절 동작별로 묶어서 사용하였으며, 굴곡 및 신전, 요골 및 척골 편향, 그리고 회내 및 회외의 비틀림의 변수가 각각 1개의 변수로 사용되었다. 또한 이하의 분석에서 각 독립 변수의 표기로서 사용된 F, U, T, L은 각기 Flexion/Extension, Ulnar/Radial deviation, Supination/Pronation, Load를 의미한다.

본 연구의 실험 계획은 반응표면모델(Response surface designs)의 하나인 CCD(Central Composite Design) 중에서 CCC(Central Composite Circumscribed Design)를 사용하였다. CCD는 반응표면모델 중 한 가지로서 각각의 변수에 대해 다섯 가지의 뚜렷한 수준(level)을 가지며, 각각의 수준은  $-\alpha$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$ ,  $+\alpha$ 로 표현된다. 그리고 4가지 변수의 실험 설계에서  $\alpha$  값은 1.414이다(Myers, 1976). 또한 CCD는 직교 가능한 모델로서 기술적으로 발생하지 않는 2차 회귀모형(second-order regression)의 부호화된 변수 값(coded factor value) 중 상관관계를 제거함으로써 상대적으로 적은 실험 계획이 가능하다(Williges, 1981). 따라서 본 연구에서는 이러한 CCD의 특성 상 부호화된 값을 사용하여 연구를 수행하였다. 또한 반응표면모델 및 CCD에 대한 자세한 설명은 현대실험 계획법(민영사, 2003)을 참고하였다.

다음의 표 3은 본 연구에서 정의된 CCD에서의 독립 변수

표 2. 손목 동작 범위 및 수준

동작	기존 연구	범위(°)
굴곡	Armstrong, Genaidy	0~15, 15~45, >45
	Ketola	0~20, >20
	Moore and Garg	0~25, >25
	REBA	0~15, >15
	RULA	0, 0~15, >15
신전	Armstrong, Genaidy	0~15, 15~45, >45
	Ketola	0~20, >20
	Moore and Garg	0~20, 20~45, >45
	REBA	0~25, >25
	RULA	0, 0~15, >15
척골 편향	Armstrong	0~25, >25
	Genaidy	>0
	Ketola	>20
	Moore and Garg	0~10, >10
요골 편향	REBA, RULA	Ulnar deviation
	Armstrong, Genaidy, Moore and Garg	>0
	Ketola	0~20, >20
회외	REBA, RULA	Radial deviation
	Armstrong	0~45, >45
	Genaidy	0~15, >15
	REBA	Supination
회내	RULA	Mid range, at/near end
	Armstrong, Genaidy	0~15, >15
	REBA	Pronation
외부 부하 (kg)	RULA	Mid range, at/near end
	기도형	1, 2, 3, 4
	RULA	0~2, 2~10, >10

및 수준을 나타낸 것이다.

표 3. 독립 변수 및 수준

Independent Variable	- $\alpha$	-1	0	1	+ $\alpha$
Flexion(+)/ Extention(-)	-45°	-32°	0°	32°	45°
Ulnar(+)/ Radial(-) deviation	-20°	-14°	0°	14°	20°
Twist - Supination(+) /Pronation(-)	-80°	-56°	0°	56°	80°
Load(kg)	0kg	1kg	3.2kg	5.5kg	6.5kg

본 연구는 위와 같은 4가지의 독립 변수를 사용하며, 1개의 중심점(center point)을 갖는 Within - subject design의 CCD를 사용한다. 실험 횟수는 모두  $2^4 + 2 \times 4 + 1 = 25$ 이며, 이 중  $2^4$  즉, 16개의 자료 점(Data point)은 1차 효과 즉, 주효과를 나타내며, 8개의 추가 점(Additional point)은 변수의 2차 효과(Quadratic effects)의 실험을 의미한다(박성준, 1995). 그림 3은 CCD 모형을 나타낸 것으로 좌측의 정방형 CCD 모형은 일반적인 CCD의 모형으로 본 연구에서의 모형은 우측의 모형과 같다. 우측 모형의 형태는 시상 간격(Sagittal distance)로 표현되었으며, 각각의 숫자는 CCD의 자료 점으로서 각 위치에서의 실험 번호를 나타낸다. 각각의 실험 번호는 F, U, T, L 변수 즉, 4가지 변수의 수준별 조합으로 이루어지며, 예를 들어 3번 실험과 같은 경우 F(1), U(1), T(1), L(1)의 순서로 실험이 조합된다. 특히, T와 L의 변수는 16개의 자료 점에서 각각 (1, 1), (1, -1), (-1, 1), (-1, -1)의 조합으로 표현된다. 또한 8개의 추가 점에서 각 변수별로 1.414와 -1.414의 값을 1회씩 갖는다.

2.3 주관적 불편도 평가

피실험자는 위의 CCD 실험 계획의 불편도 측정과 함께 9단계의 불편도 의미 척도(Verbal scale)에 해당하는 불편도를 magnitude estimation 기법으로 평가하였다. 9단계의 불편도 의미 척도의 수준은 매우 쉬움, 쉬움, 조금 쉬움, 보통, 조금 불편, 불편, 조금 힘들, 힘들, 매우 힘들로 정의하였다. 불편도 의미 척도에 대한 불편도 평가는 각 피실험자들의 불편도 평가 기준이 다르므로 Magnitude estimation에서 얻어진 숫자로 된 불편도의 의미를 이해하기 위한 목적으로 수행되었다(Han et al., 1998).

2.4 실험 절차

실험에 앞서 피실험자에게 실험 목적, 내용 및 방법과 실험

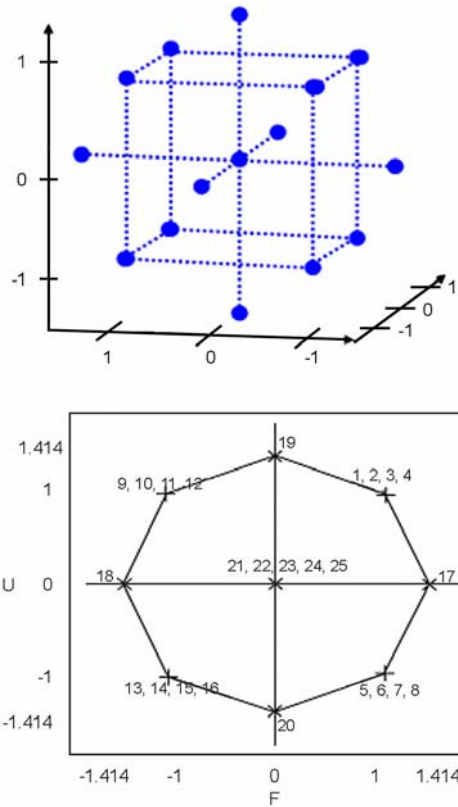


그림 3. 실험 계획 모형 - 정방형 CCD 모형(상)과 시상 간격(Sagittal distance) 모형(하)

과정에서 있어 위험성에 대한 설명이 이루어졌으며, 실험 참여에 동의한 피실험자에 대한 연령, 신장, 체중 및 근골격계질환에 관한 병력에 관한 설문도 수행하였다. 또한 실험 실시 전 Calibration test를 실시하여 본 실험을 수행할 능력을 충분히 검증한 후 실험에 임하였다. Calibration test는 Numerical estimate 방법과 Line production 기법을 이용하여 수행하였으며, 본 연구에 참여한 18명의 피실험자 중 Calibration test에 통과한 16명이 본 실험에 참여를 할 수 있었다. 실험에 통과한 피실험자는 손목 관절의 움직임과 자세 및 무게에 대한 사전 동작의 연습을 하도록 하였다.

실험은 위치 지시계(Location pointer)를 두어 손목 자세 형성에 도움을 주도록 하였으며, 양 발이 땅에 닿은 상태의 앉은 자세에서 팔꿈치를 지지대에 기대 수 있게 하였다. 따라서 무게 부하는 손목 이외의 지체에 영향을 받지 않도록 하였으며, 1인 1회의 실험을 반복 없이 25회 실시하였다. 또한 실험 순서는 임의(Random)로 제시하였다.

자세 유지 시간은 예비 실험(pilot test)를 통해서 40초로 선정하였다. 예비 실험은 calibration test를 통과한 3명을 대상으로 10초부터 1분 30초까지 10초 단위로 자세 유지 시간의 변경을 통해 이루어졌다. 이러한 결과 실험 자료의

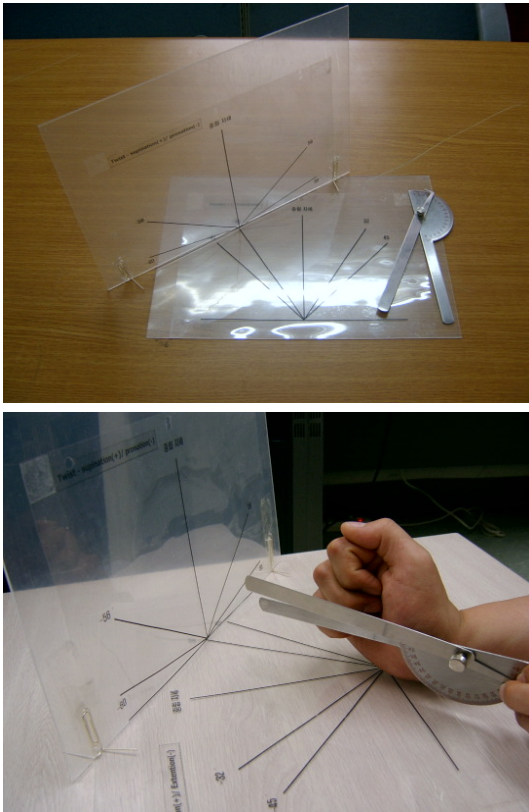


그림 4. 위치 지시계(상)와 실험 형태(하)

신뢰성을 유지하기 위해서는 최소한 20초 이상의 자세 유지 시간이 필요하지만, 50초 이상 자세 유지를 할 경우 외부 부하에 따른 일관된 불편도를 얻을 수 없었다. 즉, 자세 유지 시간이 일정 수준 이상 될 경우 주어진 외부 부하에 대해서 실험 오류 및 신뢰성이 떨어지는 결과를 얻을 수 있음을 뜻한다. 실제로 기도형(2004a)의 연구 결과에서 여러 외부 부하에 대해 40초를 초과한 자세 유지 시간을 가질 경우 실험의 신뢰성이 낮아지며, 실험의 오류가 커진다는 것을 알 수 있다.

각 실험의 수행은 피로 누적으로 인한 불편도의 증가를 제거하기 위하여 1회 실험 후 5분간 휴식 시간을 두어 실험을 실시하였으며 휴식 시간이 지난 후에는 피실험자가 충분한 휴식을 취했는지 확인하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 주관적 불편도의 정규화

본 연구는 피실험자의 주관적 불편도의 측정을 위해서

magnitude estimation을 사용하였다. 그러나 피실험자의 주관적 불편도에 대한 원시데이터(raw data)를 직접 분석하는 것은 불가능하기 때문에 본 연구에서는 주관적 불편도의 정규화 작업을 거쳐 분석에 사용하였다.

주관적 불편도 평가는 심물리학적 연구에서 널리 이용되고 있는 Free-modulus magnitude estimation을 이용하였다. Free-modulus magnitude estimation은 피실험자들에게 평가 기준을 제시하지 않고 각 피실험자가 고유의 기준으로 주어진 자극에 대한 양을 비율 척도로 평가하도록 하는 방법으로, 심물리학적 연구 분야에서 널리 이용되는 방법이다.

본 연구에서는 max-min transformation을 사용하여 아래와 같은 방법으로 주관적 불편도를 표준화하였다(Hwang and Yoon, 1981; Gescheider, 1985; Han et al., 1999).

$$\text{Standardized Discomfort} = \frac{(\text{Raw data} - \text{minimum data})}{(\text{maximum data} - \text{minimum data})} \times 100 \quad (2)$$

여기서 최대 불편도와 최소 불편도는 피실험자의 자세 평가 불편 수준의 최대 값과 최소 값을 나타낸다.

#### 3.2 회귀분석

표준화된 심물리학적 불편도 값과 손목 자세간의 기능적 관계와 본 연구에서 사용된 표준화된 심물리학적 불편도 값이 어떠한 함수 모형에 적합한지에 대한 여부를 분석하기 위하여 CCD 모델에 대한 회귀분석에서 분산분석을 실시하였다.

표 4는 회귀 모델에 대한 분산분석 결과이며, 본 연구의 불편도 모델 유형의 분석을 위해 사용되었다. 즉, 표 5의 회귀분석의 분산분석 결과로, 각 변수는 부호화된 변수를 사용한다. 이러한 분산분석의 결과를 활용하여 선형(Liner), 2차식(Quadratic), 교차곱(Crossproduct)의 모든 유형이 포함된 함수 모델을 만들 경우 전체 함수 모델의  $R^2$  값이 0.91로 매우 높은 설명력을 지닌 모델을 만들 수 있다. 또한 선형, 2차식, 교차곱의 각각의 함수 모델은  $R^2$  값이 0.8796, 0.0372, 0.0027로서 전체 함수 모델 중 Liner 형태의 함수 모델이 높은 함수 설명력을 갖는 것을 알 수 있으며, 2차식과 교차곱의 함수는 모델 설명력이 낮음을 알 수 있다. 또한 전체 모델을 포함한 각각의 함수 모델은 유의 수준 0.05에서 통계적으로 유의한 의미를 가진다.

표 5는 부호화 변수의 분산분석 결과로서 본 연구에서 사용된 변수의 유의성을 판단하기 위하여 사용되었다. 표 5에서 보는 바와 같이, 유의 수준 0.01에서 통계적으로 유의

한 의미를 가지는 변수는 F, U, T, L F\*F, U\*U, T\*F, T\*U, L\*F, L\*L임을 알 수 있으며, 이 변수를 이용하여 표 4의 전체 함수 모델을 포함하는 불편도 모델을 만들어 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{불편도} = & 32.39 - 1.66(F) + 5.83(U) + 1.90(T) + \\ & 31.48(L) + 9.32(F*F) + 7.15(U*U) - \\ & 6.63(L*L) - 0.89(T*F) + 0.76(T*U) - \\ & 1.45(L*F) \end{aligned} \quad (3)$$

표 4. CCD 모델에 대한 분산분석

Regression	DOF	Type I sum of square	R <sup>2</sup>	F Value	Prob > F
Linear	4	247567	0.8796	2419.43	<.0001*
Quadratic	4	17571	0.0372	171.72	<.0001*
Crossproduct	6	728.72	0.0027	4.75	0.0001*
Total Model	14	265866	0.9195	742.36	<.0001*

\*: 유의수준 0.01에서 유의함

표 5. 회귀분석의 분산분석

Intercept	DOF	Parameter estimate	Standard error	t value	Prob> t
Intercept	1	32.3917	0.8758	36.98	<.0001*
F	1	-1.6626	0.3264	-5.09	<.0001*
U	1	5.8346	0.3264	17.87	<.0001*
T	1	1.9061	0.3264	5.84	<.0001*
L	1	31.4825	0.3264	96.43	<.0001*
F*F	1	9.3206	0.5163	18.05	<.0001*
U*F	1	-0.1875	0.3650	-0.51	0.6079
U*U	1	7.1532	0.5163	13.85	<.0001*
T*F	1	-0.8958	0.3650	-2.45	0.0147**
T*U	1	0.7604	0.3650	2.08	0.0381**
T*T	1	0.9847	0.5163	1.91	0.0575
L*F	1	-1.4583	0.3650	-4	<.0001*
L*U	1	0.3229	0.3650	0.88	0.3771
L*T	1	0.3854	0.3650	1.06	0.2919
L*L	1	6.6322	0.5163	12.85	<.0001*

\*: 유의수준 0.01에서 유의함, \*\*: 유의수준 0.01에서 유의함

식 3의 불편도 모델은 손목 불편도에 관한 각각의 변수별 영향을 효과적으로 분석하기에는 부족하며, 실제 불편도 값과의 영향을 판단하기에도 부족하다. 따라서 본 연구에서는 위의 불편도 모델과 더불어 각각의 변수별 불편도 정도를 알아보기 위하여 다음과 같이 변수별 주관적 불편도 그래프를 작성하였다. 변수별 주관적 불편도 그래프에서는 변수 수준

의 부호화된 값을 실제 각도 값으로 표현하였으며, 각 변수는 중립 자세를 중심으로 동작 구분이 가능하기 때문에 다음의 불편도 그래프는 각각의 변수의 구분을 통해 기존 손목 자세의 체계와 같도록 하였으며, 기존 연구와의 혼란을 줄이도록 하였다.

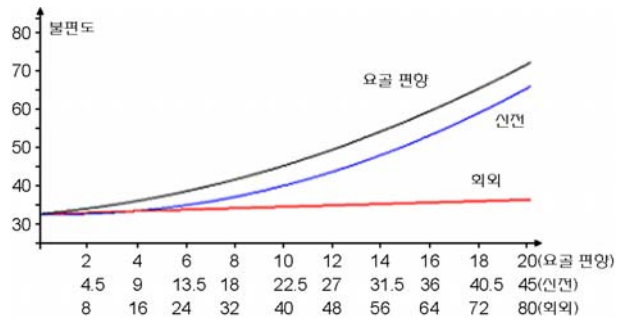


그림 5. 신전, 요골 편향, 회외의 주관적 불편도 그래프

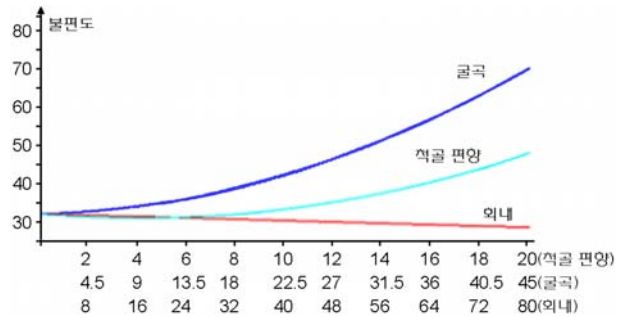


그림 6. 굴곡, 척골 편향, 회내의 주관적 불편도 그래프

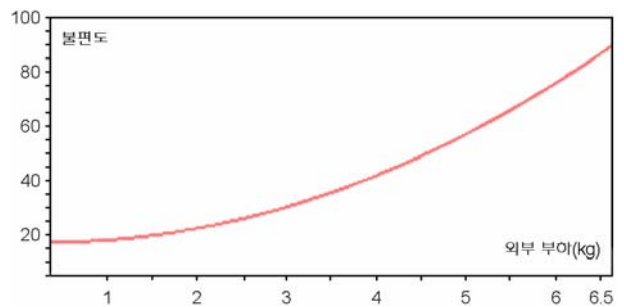


그림 7. 외부 부하의 주관적 불편도 그래프

### 3.3 교호 작용

분산분석 결과, 각 변수 간 교호 작용이 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 교호 작용이 발생한 변수는 F\*L, F\*T, U\*T로서 유의 확률의 값이 각각 <0.001, 0.0147, 0.0381로 유의 수준 0.005 하에서 유의함을 보였다. 즉, 회전 동작에서

는 굴곡 및 신전 그리고 요골 및 척골 편향과의 교호 작용이 발생하며, 외부 부하는 굴곡 및 신전 동작과 동시 발생 시 통계적으로 유의한 교호 작용이 발생하는 것이라고 말할 수 있다.

다음의 식 4, 5, 6은 불편도 모델과 교호 작용이 발생한 변수에 대한 미분을 수행한 결과이다.

$$\frac{\partial Discomfort}{\partial F} = -1.66 + 18.64F - 0.89T - 1.45L \quad (4)$$

$$\frac{\partial Discomfort}{\partial T} = 1.9 - 0.89F + 0.76U \quad (5)$$

$$\frac{\partial Discomfort}{\partial L} = 31.48 - 13.26L - 1.45F \quad (6)$$

그러나 위의 식의 변수 값은 CCD의 부호화된 값으로서 불편도 모델에 미치는 교호 작용의 영향을 파악하기 위해서는 실제 각도 값의 변환이 필요하며, 미분 계수치를 이용한 교호 작용 분석은 실제 불편도 모델에서의 값과 직접 비교하기에는 불편하다.

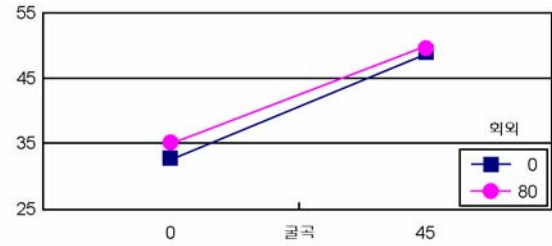
따라서 본 연구에서는 식 2의 불편도 모델을 직접 사용하여 변수 간 교호 작용을 분석하였으며, 그림 8은 식 2의 불편도 모델에서의 값을 직접 사용한 교호 작용의 그래프이다.

F\*T의 변수는 굴곡과 신전 및 회내와 회외의 교호 작용을 뜻하는 것으로, 그림 8(a)와 같이 굴곡 각도가 증가하여 갈수록 회외의 0°와 80° 사이의 주관적 불편도 값이 감소하는 것으로 나타났다. U\*T는 요골 및 척골 편향과 회내 및 회외의 교호 작용을 뜻하는 것으로, 그림 8(b)에서 보는 바와 같이 척골 편향의 각도 값이 증가할수록 회내의 0°와 80° 사이에서 주관적 불편도 값이 감소하는 것으로 나타났다.

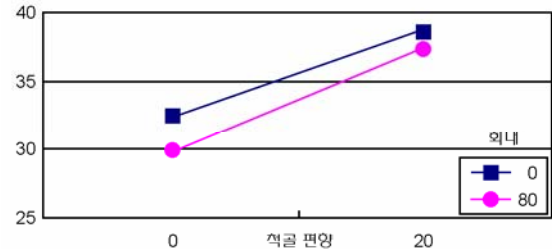
또한 그림 8(c)에서 볼 수 있듯이 외부 부하의 무게가 커질수록 굴곡의 0°와 45° 사이에서의 불편도 값은 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 외부 부하가 발생했을 경우 몸 안쪽으로 당기는 즉, 굴곡의 동작의 발생할 경우 외부 부하에 관한 불편도 값의 영향을 감소시키는 것을 의미한다.

3.4 불편도 의미 척도

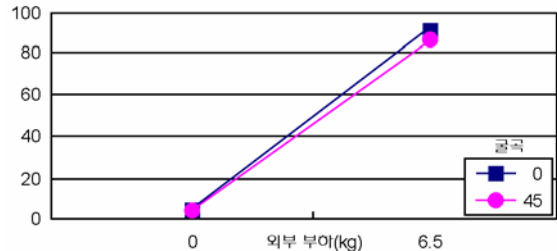
본 연구에서는 손목 자세 및 외부 부하에 대한 불편도 평가와 동시에 주관적 불편도 값에 대한 9단계의 불편도 의미 척도를 병행하여 실험하였다. 9단계의 불편도 의미에 대한 수치는 손목 자세 불편도 값과 마찬가지로 Max-min transformation을 사용하여 불편도 값을 표준화 하였으며, 각 의미에 대한 불편도 평균은 그림 9에서 알 수 있다.



(a) 굴곡과 회외의 교호 작용



(b) 척골 편향과 회내의 교호 작용



(c) 외부 부하와 굴곡의 교호 작용

그림 8. 각 변수별 교호 작용 그래프

주관적 불편도 점수의 의미 척도에 대한 분석은 불편도 모델에서 계산되는 불편도 값에 정성적인 의미를 해석하기 위한 것으로, 그림 9에서 제시된 각 단계의 불편도 의미는 불편도 값에 대한 의미를 세밀히 평가할 수 있는 장점은 있으나 작업 위험도 평가 도구로 활용되기에는 적절치 않다. 특히 널리 알려진 OWAS, RULA, REBA 등의 작업 자세 평가 기법 역시 작업의 위험도 수준을 4~5 단계로 구분하여 작업 자세에 대한 위험도 평가를 쉽게 가능하도록 하였다 (Karhu et al., 1977; McAtamney and Corlett, 1993; 이인석 등, 2001).

본 연구에서는 이러한 작업 위험도 평가를 위한 5단계의 그룹평을 위하여 Duncan의 다중 범위 검정(Multiple range test)을 수행을 유의 수준 0.05 하에서 실시하였다.

Duncan의 다중 범위 검정 결과는 그림 9와 같으며, 각 단계 별 불편도 수치 중 불편도가 높지 않은 영역에서 여러 단계의 의미를 하나로 묶는 방식으로 불편도 의미를 5단계의 위험도 수준으로 정의하였다.

또한 5단계의 위험도 수준의 정의 역시 기존의 자세 평가



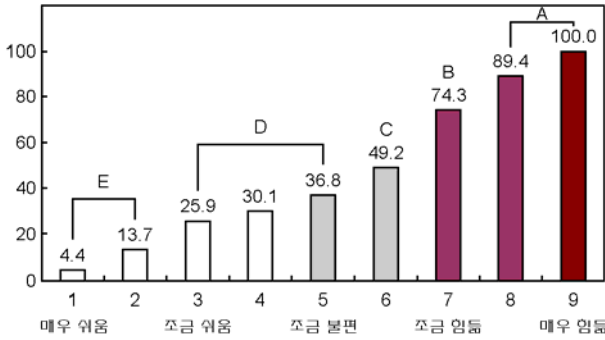


그림 9. 9단계 불편도 척도의 평균과 Duncan의 다중 범위 검정 결과

기법의 위험도 수준을 적용하여 아래의 표 6을 제시하였다.

표 6. 불편도 점수에 따른 위험도 수준

위험도	불편도 값	조치 수준
A	> 90	지금 즉시 필요함
B	75~90	곧 필요함
C	50~75	필요함
D	25~50	필요할 가능성이 있음
E	25<	필요하지 않음

### 3.5 손목 자세 및 외부 부하의 불편도 평가 체계

손목 자세 및 외부 부하에 대한 불편도 모델을 사용하여 표 7과 같은 불편도 평가 체계에 대한 표를 만들 수 있었다.

표 7은 외부 부하 2kg에서의 손목 자세별 불편도 점수를 나타내고 있다. 그러나 이러한 표를 사용하여 불편도를 측정하는 것은 너무 복잡할 뿐만 아니라 외부 부하 별 즉, 외부 부하를 0kg에서 6.5kg까지의 변화에 따른 색인(Index)을 만들어 불편도를 측정해야 한다. 이러한 불편도 평가는 색인 자체로서의 참고는 될 수 있으나, 너무 복잡하며 쉽게 위험 수준을 측정하기에는 무리가 있다.

따라서 본 연구에서는 각 자세 및 외부 부하의 영향을 쉽게 측정할 수 있는 평가 체계를 개발하였다. 기본적인 불편도 평가의 체계는 각 독립 자세별 불편도 값과 외부 부하의 불편도 값을 더하여 종합 불편도 점수를 계산하는 것으로 이루어진다. 그러나 앞의 회귀분석 및 교호 작용에 대한 결과에서 보았듯이 불편도 모델에서 교호 작용이 발생하였으며, 특히 불편도 모델에서 F\*T, F\*L, U\*T 변수는 교호 작용으로 인해 불편도 값에 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

이러한 교호 작용의 불편도 영향으로 인하여 손목 불편도 평가 체계는 단순히 각각의 손목 자세 및 외부 부하의 불편도 값의 합산으로 표현하기 보다는 개개의 불편도 값과 교호

표 7. 외부 부하 2kg의 불편도 점수표

Load 2kg		굴곡/신전(-)						
요골/측골(-)	회내/회외(-)	-45	-30	-15	0	15	30	45
-20	-80	40	30	24	22	25	31	41
	-60	41	31	25	23	25	31	41
	-40	42	31	25	23	25	31	41
	-20	42	32	25	23	25	31	41
	0	43	32	26	23	25	31	41
	20	44	33	26	24	25	31	41
	40	45	34	27	24	25	31	40
	60	45	34	27	24	26	31	40
	80	46	35	28	25	26	31	40
-10	-80	33	23	17	15	17	23	34
	-60	34	23	17	15	17	24	34
	-40	34	24	18	16	18	24	34
	-20	35	25	19	16	18	24	34
	0	36	26	19	17	18	24	34
	20	37	26	20	17	19	24	34
	40	38	27	20	18	19	24	34
	60	39	28	21	18	19	25	34
	80	40	29	22	19	20	25	34
0	-80	32	22	16	15	17	23	33
	-60	33	23	17	15	17	23	34
	-40	35	24	18	16	18	24	34
	-20	36	25	19	17	18	24	34
	0	37	26	20	17	19	25	34
	20	38	27	20	18	19	25	35
	40	39	28	21	19	20	25	35
	60	40	29	22	19	20	26	35
	80	41	30	23	20	21	26	35
10	-80	39	29	23	22	24	30	41
	-60	41	31	24	22	24	31	41
	-40	42	32	25	23	25	31	41
	-20	43	33	26	24	26	32	42
	0	45	34	27	25	27	32	42
	20	46	35	29	26	27	33	43
	40	47	36	30	27	28	34	43
	60	49	38	31	28	29	34	44
	80	50	39	32	29	30	35	44
20	-80	54	44	38	36	38	44	55
	-60	55	45	39	37	39	45	55
	-40	57	46	40	38	40	46	56
	-20	58	48	41	39	41	47	57
	0	60	49	43	40	42	48	57
	20	61	51	44	41	43	48	58
	40	63	52	45	42	44	49	59
	60	64	53	46	43	45	50	59
	80	66	55	47	44	45	51	60

작용으로 인한 불편도 변화의 보정 과정이 필요하다.

교호 작용의 불편도 변화폭은 식 4, 5, 6에 각 변수 값을 대입하여 계산할 수 있다. 즉, F\*T의 교호 작용을 예를 들면, 식 4에서 T의 계수 값이 -0.89로 T 변수의 값이 1 변할 때 불편도의 값의 변화가 -0.89가 변하는 것을 알 수 있다. 그러나 T 변수 값 1은 부호화된 값으로서 1에 해당하는 T의 실제 각도 값은 56°이다. 즉, F\*T의 교호 작용에서 회내 및 회외로 56° 움직일 때 불편도의 변화는 각각 -0.89와 0.89 변화를 보인다. 부호화 변수의 실제 값으로의 변환은 실험 계획에서 변수 값의 비례를 이용해서 구할 수 있다.

이와 같은 방법으로 실제 각도 값의 부호화 변환을 통해 식 4, 5, 6에 대입하여 계산해보면, T\*F 동시 발생 시 회내 및 회외의 각도 값이 20°씩 변할 때 회외는 -0.31, 회내는 +0.31의 불편도 변화량이 발생한다. 마찬가지로 방법으로 T\*U 동시 발생 시 요골 및 척골 편향의 각도 값이 10°씩 변할 때 요골 편향은 +0.54, 척골 편향은 -0.54의 불편도 변화량이 발생하며, F\*L 동시 발생 시 굴곡 및 신전 각도가 15°씩 변할 때 굴곡은 -0.67, 신전은 +0.67의 불편도 변화량이 생긴다.

그러나 이러한 불편도 변화량을 이용하여 전체 불편도 점수를 계산하는 것은 전체 점수의 변화폭 및 불편도 의미 척도의 그룹 간 점수 간격에 비해 실제 불편도 값의 변화폭이 미미함을 알 수 있다. 즉, 불편도 점수를 계산함에 있어서 교호 작용에 의한 불편도 값의 보정 점수 체계를 사용한 것과 교호 작용을 고려하지 않은 개개의 불편도 값을 합산한 것과 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 또한, 표 4의 CCD 모델에 대한 분산분석 결과에서 볼 수 있듯이 교호 작용의 항목이 포함된 교차항(Crossproduct)의 영향이 전체 불편도 모델에 주는 영향이 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 즉, 이러한 교호 작용을 고려한 불편도 보정 점수 체계를 적용하

였을 경우 전체 불편도 체계의 복잡성만 증가되며, 따라서 본 연구의 불편도 점수 체계는 교호 작용의 결과를 제외한 다음의 그림 8과 같은 손목 자세의 부하 평가 체계를 도출하였다.

그림 10의 손목 자세 부하 평가 체계는 교호 작용을 고려하지 않은 각각의 손목 자세 별 불편도 값과 외부 부하에 대한 불편도 값의 합으로 계산되며, 그림 10에 제시된 각 자세의 불편도 값은 식 2의 각 변수에 실제 각도 값의 부호화 된 값을 대입하여 얻은 결과이다. 따라서 복합 자세의 불편도 값은 각 자세의 불편도 값과 외부 부하에 의한 불편도 값을 더하여 전체 불편도 값으로 쉽게 계산 가능하며, 이러한 불편도 값의 정성적 평가를 위하여 3, 4장의 표 6에서 정의된 5단계 위험도 수준을 적용하여 발생 가능한 손목 작업의 위험도 수준을 판단한다.

그림 10의 손목 불편도 부하 평가 체계를 이용하여 실제 불편도 값을 계산하면 다음과 같다. 예를 들어 신전 45° (20), 회외 40°(-1), 요골편향 20°(+6)의 손목 자세와 외부 부하 2kg(+17)의 작업 상황이라고 하면 전체 불편도는 42점이다.

이러한 불편도 평가 체계에 의해서 계산된 점수와 실제 불편도 값의 모델링에 의해 계산된 값과 비교해 보면, 표 7의 실제 불편도 점수는 위의 작업 상황일 때 44점으로 2점의 점수가 차이가 나는 것을 알 수 있다. 즉, 실제 불편도 점수와 불편도 평가 체계에 의해 계산된 점수가 거의 유사함을 알 수 있다.

따라서 본 평가 체계에 의해 계산된 불편도 값을 위험도 수준의 그룹별 불편도 값과 비교하면 불편도 점수 25~50에 속하므로 위험도 D 수준 즉, 작업 조치 수준이 '필요할지도 모름'에 속하는 작업 형태라고 판단할 수 있다.

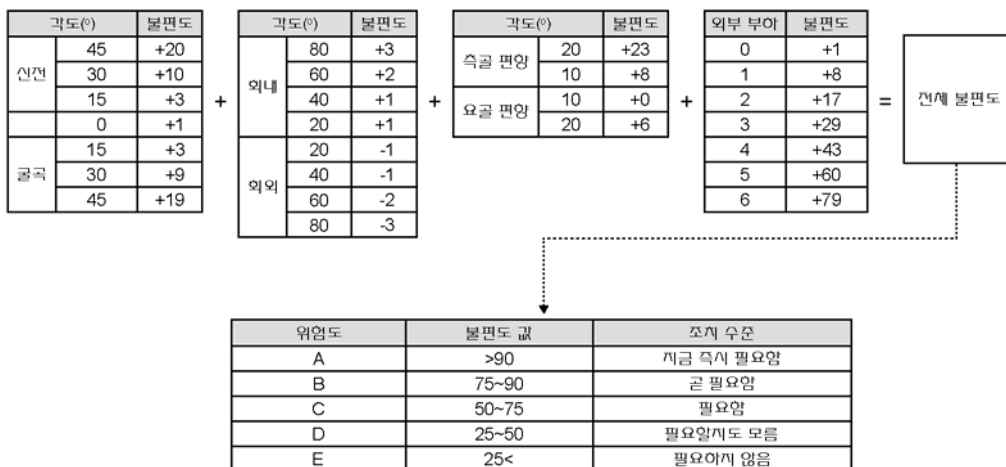


그림 10. 손목 불편도 부하 평가 체계

3.6 불편도 평가 체계의 타당성 분석

본 연구에서 제안하는 부하 평가 체계를 검증하기 위하여 실험 결과에 의한 각 손목 자세의 불편도 점수와 불편도 부하 평가 체계에 의하여 산출된 불편도 점수에 대한 추가 분석을 수행하였다. 추가 분석은 각 체계에 의해 발생된 점수의 선형회귀분석을 통해서 이루어졌으며, 예측치를 종속 변수, 측정치를 독립 변수로 하여 선형회귀분석을 수행한 결과 기울기가 0.98, 95% 신뢰구간이 1.0을 포함하는 것으로 나타났다. 즉, 0.98의 매우 높은 수준의  $R^2$ 를 가지는 것을 알 수 있었으며, 본 연구에서 제시한 불편도 평가 체계가 손목 작업의 실제 주관적 불편도 수준을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

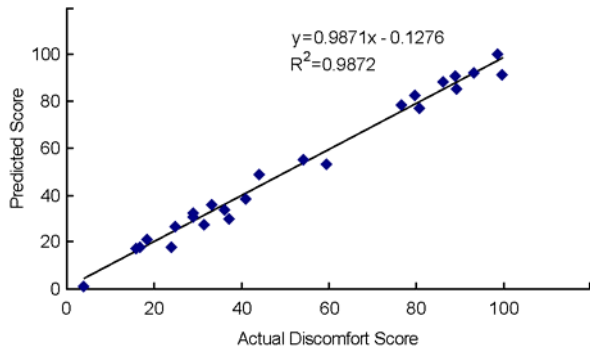


그림 11. 실제 값과 예측 값의 불편도 관계 - 회귀분석

3.7 기존 연구와의 비교

기도형(2004a, 1998) 및 Eilis(2005)는 작업 자세 및 외부 부하에 대한 분석 중 손목에 대하여 신전 및 굴곡, 척골 편향 및 요골 편향에 대하여 본 연구와 유사한 방식으로 주관적 불편도를 평가하였다.

표 8은 본 연구의 결과 중 각 자유도의 기본 자세에 대한 결과와 기도형(1998) 및 Eilis et al.(2005)의 결과를 비교한 것으로서, 표에서 보는 바와 같이 각 연구 결과의 최대 값이 서로 상이하다. 따라서 각 연구의 비교를 위하여 손목 자세의 불편도 유형을 중심으로 아래와 같은 분석을 실시하였다. 또한 표 8에 기재된 Eilis et al.(2005)의 연구 결과는 Eilis et al.(2005)의 연구 결과 중 기본 ROM(Range of Motion)에서 본 연구와의 기본 자세를 비교하기 위해 각도 값의 수정이 이루어졌다.

3.7.1 신전 및 굴곡 자세

기도형(2004a, 1998)의 연구 결과와 본 연구의 신전 및 굴곡의 자세를 비교해 보면 중립 자세(굴곡 또는 신전이 0°

표 8. 기존 연구와의 비교표

자세	본 연구	기도형(1998)	Eilis et al.(2005)	
신전	각도(°)	0 15 30 45 .	0 20~60 >60	0 15 30 45
	불편도 값	1 3 10 20 .	1 5 11	0.1 2.2 4.2 6.3
굴곡	각도(°)	0 15 30 45 .	0 20~60 >60	0 15 30 45
	불편도 값	1 3 9 19 .	1 4 9	0.5 1.5 2.6 3.7
척골 편향	각도(°)	0 10 20 . .	0~10 10~20 >20	0 10 20 .
	불편도 값	0 8 23 . .	1 5 9	0.2 3.7 7.4 .
요골 편향	각도(°)	0 10 20 . .	0~10 10~30 >30	0 10 20 .
	불편도 값	0 0 6 . .	1 5 10	0.1 2.1 4.0 .
회내	각도(°)	0 20 40 60 80	0~90 >90 .	. . . .
	불편도 값	0 1 1 2 3	3 9 .	. . . .
회외	각도(°)	0 20 40 60 80	0~70 >70 .	. . . .
	불편도 값	0 -1 -1 -2 -3	3 9 .	. . . .

인 자세)에서 벗어날수록 불편도의 증가를 보임을 알 수 있다. 특히 신전 동작에서의 불편도 값이 굴곡의 동작보다 조금 크게 나타났으나 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서의 신전 및 굴곡의 자세 분석과 동일한 형태의 결과로 이러한 경향을 더 쉽게 파악하기 위하여 기존 연구 및 본 연구의 불편도 값에 대한 선형 모델을 만들어 그림 12, 그림 13과 같은 그래프를 작성하였다.

위의 그래프는 X 축이 변수의 각도 값이며, Y축이 해당 연구의 불편도 값이다. 그래프를 살펴보면 각 연구의 계수가 양의 값을 갖는 것을 알 수 있으며, 각 연구마다 약간의 차이가 발생함을 알 수 있다. 이는 위에서 언급한 것과 같이 각 연구의 손목 동작 범위의 정의와 최대 불편도 값이 서로 다른 이유로 해석할 수 있으며, 본 연구의 계수 즉, 기울기의 차이는 최대 0.33 미만으로 손목 동작의 범위 수준과 비교해 볼 때 각 연구들과의 경향 차이는 미미하다고 할 수 있다.

3.7.2 척골 편향 및 요골 편향 자세

척골 편향 및 요골 편향의 결과 역시 기도형(1998)의 연구에서와 같이 중립 자세에서 벗어날 수록 불편도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 기도형(1998)의 연구 결과 척골 편향의 최대 불편도 값이 요골 편향의 최대 불편도 값보다 작은 것으로 나타나 본 연구 및 Eilis et al.(2005)의 연구 결과와 약간의 차이가 발생함을 알 수 있다. 이것은 기도형(1998)의 척골 편향 및 요골 편향의 동작 최대 범위가 각각

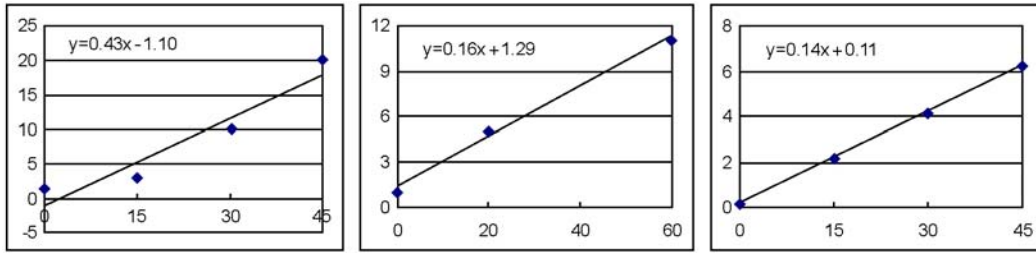


그림 12. 굴곡의 불편도 그래프(본 연구, 기도형(1998), Ellis et al.(2005))

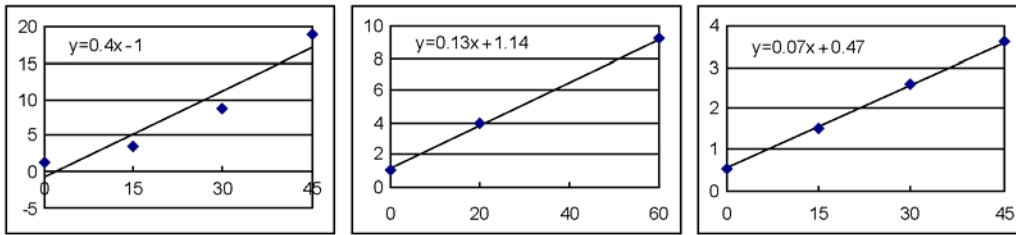


그림 13. 신전의 불편도 그래프(본 연구, 기도형(1998), Ellis et al.(2005))

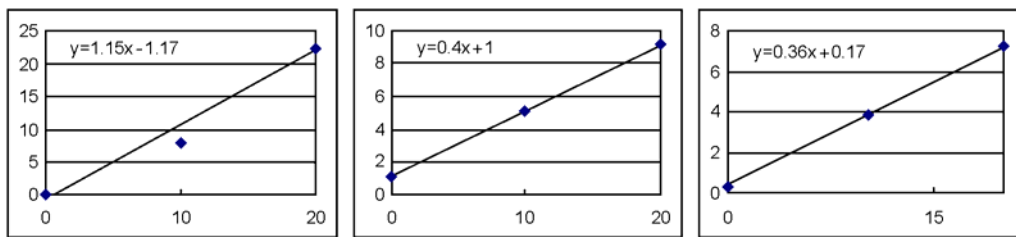


그림 14. 척골 편향의 불편도 그래프(본 연구, 기도형(1998), Ellis et al.(2005))

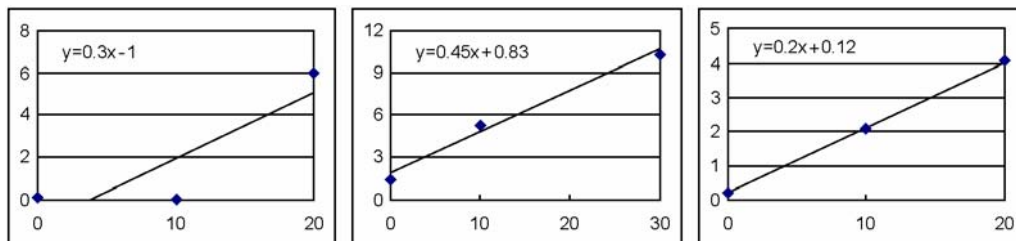


그림 15. 요골 편향의 불편도 그래프(본 연구, 기도형(1998), Ellis et al.(2005))

20°와 30°로 서로 다르게 정의된 차이에서 발생한 결과라 할 수 있으며, 본 연구 및 Ellis et al.(2005)의 연구 결과를 보면 척골 편향의 최대 불편도 값이 요골 편향의 최대 불편도 값 보다 큰 것을 알 수 있다.

불편도의 증가 역시 비슷한 경향으로 커지는 것을 볼 수 있다. 그림 14, 15는 각 연구별 불편도 값에 대한 선형 모델의 그래프로 X축은 손목 동작의 각도, Y축은 불편도 점수를 나타낸다.

각각의 연구에서 발생한 최대 기울기 차이는 약 0.25로 척골 및 요골 편향의 동작 범위와 비교해 볼 때 미미한 수준이며, 3가지 연구 모두 불편도 증가에 있어서 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

### 3.7.3 회내 및 회외의 자세

회내 및 회외의 자세 분석에서는 본 연구와 기존 연구의 차이점을 발견할 수 있었다. 회내의 경우에는 본 연구와

기도형(1998)의 연구 결과가 유사한 경향을 보이며 불편도가 증가한다. 그러나 회외의 경우에서 본 연구는 중립 자세에서 벗어날수록 불편도의 변화가 단조 감소하는 경향을 보인 반면에 기도형(1998)의 연구에서는 단조 증가하는 형태로 불편도의 기울기가 서로 다름을 알 수 있다.

이러한 불편도 경향의 차이는 손목 동작 분석 구분에서 오는 차이로서 기도형(1998)의 경우 회내 및 회외의 자세

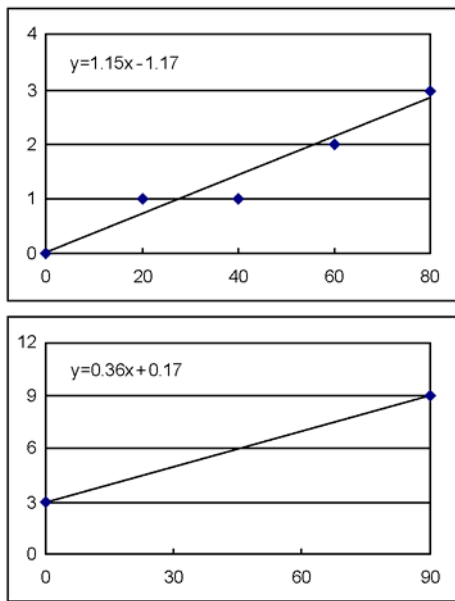


그림 16. 회내의 그래프(본 연구(상)와 기도형(1998)의 연구(하))

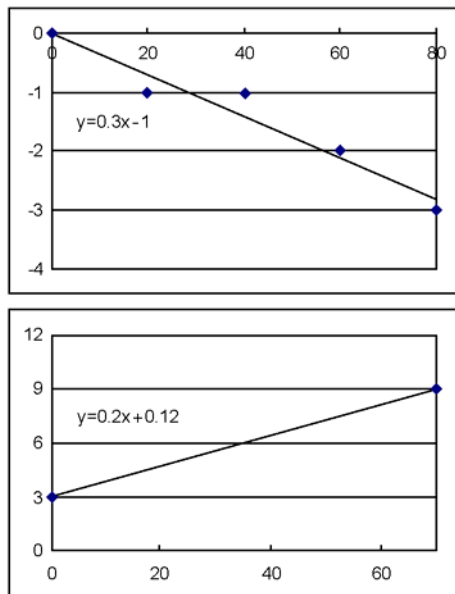


그림 17. 회외의 그래프(본 연구(상)와 기도형(1998)의 연구(하))

를 팔꿈치의 동작으로 판단, 팔꿈치의 불편도를 측정하였다. 이것은 서론에서 언급한 것과 같이 회내 및 회외의 동작이 엄밀하게 말하면 팔꿈치 동작이지만 실제 작업 현장에서 이러한 동작이 수작업의 불편도에 많은 영향을 미치는 요인으로 판단하였기 때문에 손목 동작으로 포함하여 실험을 진행하였다.

따라서 손목 자세의 중립 자세를 유지하는 것 보다 일정 수준의 회외의 자세가 손목 불편도를 경감 시키는 것으로 판단하였으며, 이러한 이유로 기도형(1998)의 연구 결과와의 차이를 보인 것이라 할 수 있다.

그림 16, 17은 회내 및 회외의 불편도에 관한 선형 모델 그래프이다.

### 3.7.4 외부 부하의 분석

외부 부하의 경우 기도형(2004a)의 연구에서는 서로 다른 자세 유지 시간을 변수로 하여 외부 부하의 변화를 연구하였다. 아래의 그림은 외부 부하에 따른 불편도의 변화에 대한 그래프이다.

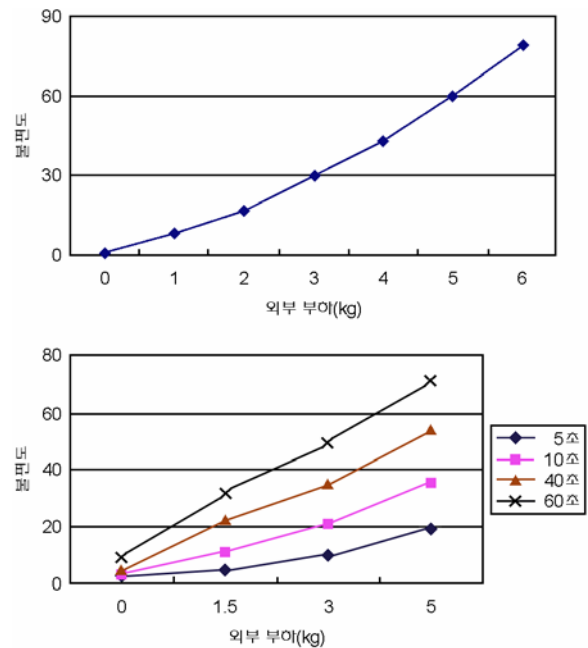


그림 18. 외부 부하의 그래프 (본 연구(상)와 기도형(2004a)의 연구(하))

기도형(2004a)의 연구는 외부 부하의 최대 무게는 5kg이며 본 실험의 최대 6.5kg로, 이러한 5kg까지의 변화량을 보면 본 연구와 매우 유사한 형태로 불편도가 증가함을 알 수 있다.

## 4. 토 의

본 연구의 분석 결과에서 손목 자세 및 외부 부하에 의한 불편도 값은 일부 자세 간의 유의한 교호 작용이 존재하는 것으로 나타났다. 즉 손목 자세가 복합 동작으로 취해질수록 주관적 불편도의 증가를 의미하며, 세부적으로는 신전 및 굴곡과 회내 및 회외의 동작, 신전 및 굴곡과 외부 부하, 척골 편향 및 요골 편향과 회내 및 회외의 동작에서의 복합 동작이 주관적 불편도의 증가됨을 의미한다. 따라서 손목의 불편도 측정은 이러한 교호 작용을 고려한 각 자세별 불편도 값을 더해야 하는 것을 알 수 있다.

그러나 이러한 불편도 값이 통계적으로 유의한 의미를 지닌다 하더라도 교호 작용에 관한 불편도의 증가를 해석해 보면 손목 자세의 복합 동작에 관한 불편도의 증가 폭이 미미한 것을 알 수 있다. 이것은 전체적인 손목 불편도 값과 작업의 위험도에 관한 Action level과 병행하여 분석할 경우 교호 작용에 의한 불편도의 영향이 매우 작음을 뜻한다.

손목 작업에 관한 불편도는 외부 부하에 의해서 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 손목 자세의 복합 동작에 있어서는 굴곡 및 신전이 불편도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 자세별 불편도를 살펴보면 굴곡 보다는 신전, 그리고 요골 편향 보다는 척골 편향의 자세가 더 큰 불편도를 야기하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 기도형(2004a, 1998) 및 Ellis et al.(2005)의 연구 결과와 유사하다.

또한 기도형(1998)의 연구에서 동일한 불편도의 크기를 보인 회내 및 회외의 불편도는 본 연구의 결과와 같지 않음을 볼 수 있는데, 이것은 기존 연구에서 실시된 회내 및 회외의 불편도 분석이 팔꿈치의 주관적 불편도 분석이라는 것에서 기인하는 것이며, 손목과 팔꿈치의 주관적 불편도 차이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구의 결과와 기존의 연구 결과들을 종합하여 볼 때, 외부 부하가 발생할 경우 신전, 요골 편향 그리고 회내의 동작으로 자세를 취할수록 상대적으로 낮은 주관적 불편도를 보일 것으로 판단한다.

손목의 기본 자세에 대한 불편도는 각 기본 자세의 자유도별 각도가 증가할수록 불편도 값 역시 증가하는 것을 보이며, 이러한 결과는 기존의 연구와 비교하여도 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 척골 편향 및 요골 편향의 경우 기도형(1998)의 연구에서는 각 동작의 불편도에 관한 최대 값이 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나 본 연구 및 Ellis et al.(2005)의 연구 결과에서는 척골 편향과 요골 편향과의 불편도 차이가 큰 것으로 나타났다.

이러한 차이의 원인으로는 실험 방법의 차이인 것으로

추정된다.

첫째, 기도형(1998)의 연구에서는 피실험자가 선 자세 혹은 앉은 자세에서 팔을 지지하지 않은 상태에서 실험이 이루어졌기 때문에 본 연구에서 제시하는 불편도와 차이가 발생 가능하다.

둘째, 본 실험과 Ellis et al.(2005)의 연구에서는 지정된 각도를 범위로 실험을 수행하였으나, 기도형(1998)의 연구에서는 피실험자의 최대 동작 범위의 크기에 대한 비율을 이용하여 실험을 수행하였다.

따라서 표 8에서 주어진 각도의 경우 기도형(1998)의 연구의 경우는 특정 각도에 대한 값이라기 보다는 각도의 범위에 대한 것이며, 제시된 자세 분류 역시 각도의 범위로 되어 있다. 특히 척골 편향과 요골 편향의 각도의 범위를 20°로 한정하여 비교한다면 본 연구 및 Ellis et al.(2005)의 연구 결과와 기도형(1998)의 연구 결과가 유사한 경향을 보인다고 할 수 있다.

외부 부하의 경우 기도형(1998)의 연구에서는 본 연구와 동일한 40초의 지속 시간에 대해 외부 부하의 크기가 커질수록 단조 증가함을 볼 수 있다. 그러나 이러한 단조 증가는 본 연구의 경우 2차 함수의 형태를 보이는 것에 비해 기존의 연구(기도형, 1998) 결과에서는 1차 함수의 형태를 보이고 있다. 이것은 주어진 범위 이내의 외부 부하에 대한 임계 수준을 판단하는데 서로 다르다고 할 수 있으나 기존의 연구 결과는 본 연구에서 실시되지 않은 지속 시간에 대한 결과이기 때문에 단편적인 결과의 비교는 어렵다.

그러나 기도형(1998)의 연구에서 외부 부하의 지속 시간을 변경하였을 때 본 연구 결과와 같은 2차 함수의 형태를 보이고 있으며, 양 연구 간의 최대 부하의 무게(kg)가 서로 일치하지 않는 것에 대한 차이 역시 추가 연구를 통한 객관적인 분석이 필요하다.

본 연구에서는 외부 부하 및 손목 자세에 대한 주관적 불편도 측정을 기준으로 손목 작업의 위험도 평가 기법을 제안하였다. 각 불편도 점수는 정규화 작업을 거쳐 사용되었으며, 피실험자의 주관적 불편도 점수를 5단계의 위험도 수준으로 변환하여 손목 작업 자세 및 외부 부하에 대한 정량적인 분석이 가능토록 하였다.

기존의 산업 현장에서 작업의 위험성을 평가하기 위해 사용되는 자세 분류 체계로는 OWAS, RULA, REBA, QEC 등이 있으며 비전문가라 할지라도 쉽게 적용하여 평가하는 것이 가능하다. 그러나 이러한 평가 기법은 상지, 하지 또는 몸통 전체에 대한 전반적인 평가를 주목적으로 하고 있어 본 연구에서 진행된 것과 같은 손목 작업 자세에 대한 평가가 불가능하다. 뿐만 아니라 현재 사용되고 있는 자세 분류 체계를 살펴보면 그 구간이 너무 커 실제 산업 현장에서 발생 가능한 중량물 또는 작업 도구나 기기의 무게 반영을 제대로

하지 못하며(기도형, 2004b), 실제 작업자가 느끼는 불편도의 반영과 위험도 평가가 어렵다.

따라서 본 연구에서 제안하는 5단계의 손목 작업 위험도 평가 체계는 기존의 자세 분류 체계의 보완뿐만 아니라, 비전문가라 할지라도 손목의 작업의 위험성을 정량적으로 쉽게 판단할 수 있는 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 복합 손목 자세 및 외부 부하에 대한 영향을 정량적으로 판단할 수 있는 평가 체계를 제안하기 위하여 굴곡 및 신전, 척골 편향 및 요골 편향, 회내 및 회외 그리고 외부 부하에 대하여 손목 불편도 평가 실험을 실시하였다. 각 손목 자세는 중립 자세를 기준으로 중립 자세에서 벗어날수록 불편도 값이 증가하는 것으로 나타났으며, 외부 부하에 대한 불편도의 증가 폭이 가장 큰 것을 알 수 있었다. 또한 각 손목 동작은 굴곡 보다는 신전이, 요골 편향 보다는 척골 편향이 불편도 증가에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었으며, 세 가지 동작에 대한 교호 작용 역시 확인할 수 있었다. 특히 이러한 교호 작용은 불편도의 증가에 영향을 주는 것으로 나타났지만 그 증가 폭은 전체 불편도 값에 비해 작은 것을 확인할 수 있었다.

또한 손목 불편도 분석과 함께 주관적 불편도의 위험 수준을 병행하여 분석하였으며, 전체의 위험도 수준으로 볼 때, 각 교호 작용에 의한 불편도의 증가폭은 작은 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 교호 작용의 영향을 제외하여 손목 작업에 대한 5단계의 위험도를 정량적으로 판단하는 손목 작업 평가 체계를 제안하였으며, 평가 체계는 각 자세의 불편도 값을 더하는 방식으로 완성하였다.

본 연구에서 제안하는 손목 불편도 평가 체계는 기존의 평가 체계에 비해 자세 분류의 세밀함이 매우 높다. 이것은 기존의 손목 관련 평가 체계가 갖는 부정확성을 보완하는 동시에 기존 연구 결과만으로는 부족한 현재의 손목 작업 관련 평가 체계의 개발을 용이하게 하는 자료로 충분히 활용 가능하다. 따라서 세밀한 평가 체계의 확립이 필요하며, 이것을 이용한 다양한 연구가 가능하리라 본다.

평가 기준의 세밀함은 정교한 작업 자세 평가가 가능하지만 작업 평가의 단점으로 작용할 수 있다. 즉, 빠르고 쉬운 평가를 요하는 작업에서 이러한 정교한 자세 구분이 평가자에게는 부담이 될 수 있다. 따라서 쉬운 평가를 위한 체계가 필요하며, 앞에서 언급한 것과 같이 본 연구의 체계를 활용하여 보다 간단한 자세 분류 체계를 구축하는 작업이 필요하다. 실제로 현재 제안하는 평가 체계에서 자세 분류를 3/4 혹은 1/2로 줄이는 것은 각 자세 분류의 불편도 점수를 합

하는 것으로 가능하다. 이렇게 다양한 자세 구분 체계로의 전환이 쉬운 것이 본 연구에서 제안하는 평가 체계의 장점이라고 할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 손목 작업의 불편도 평가 체계는 기존의 자세 분류 체계에 의한 평가 방식을 유지하여 비전문가라 할지라도 쉽게 정량적인 판단이 가능하도록 하였으며, 기존의 자세 분류 체계와 더하여 더욱 세밀한 작업 자세 평가가 이루어 질 것이라고 기대한다. 또한 본 연구에서 제시하는 평가 기법을 활용하면 기존의 작업 자세 평가 기법들이 쉽게 찾아낼 수 없었던 손목 관련 질환의 위험에 대해 쉽게 평가할 수 있으며, 서론에서 언급한 조립 공정의 손목 관련 근골격계 증상호소율 결과와 같이 많은 사람들이 근골격계질환의 위험에 노출된 작업 환경을 보다 빠르고 객관적으로 분석하여, 이러한 증상호소율을 감소시키는데 도움을 줄 수 있을 것이라 판단되며, 이에 따른 작업장의 개선이 일어난다면 손목 관련 근골격계질환의 예방이 가능할 것이다.

그러나 본 실험에서 제안하는 평가 체계는 피실험자의 주관적인 불편도를 기준으로 하고 있기 때문에 보다 객관적인 불편도의 측정과 임상 실험 및 산업재해 자료의 분석을 보완이 필요하다. 즉, 본 연구의 평가 체계 검증은 별도의 실험 결과에 의한 데이터 검증이 아닌 실험 결과의 체계 검증 단계에 지나지 않으므로, 추후 연구를 통한 현재 체계에 대한 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서 실시된 손목의 기준 자세를 확장할 수 있는 상지 전체에 대한 추후 연구가 필요할 것이다.

### 참고 문헌

권오재, 윤명환, 반복적인 손목 및 손가락 작업에서의 수작업 부하 평가, *대한인간공학회지*, 18(2), 103-120, 1999.

기도형, 인체 관절 동작의 지각 불편도에 근거한 상체의 자세 분류 체계의 개발, *대한산업공학회지*, 24(3), 447-456, 1998.

기도형, 외부 부하, 상지 자세와 지속 시간에 따른 지각 불편도, *대한산업공학회지*, 30(2), 76-83, 2004a.

기도형, 외부 부하와 반복에 따른 팔 동작의 심물리학적 자세 부하, *IE Interface*, 17(2), 218-225, 2004b.

노동부, 근골격계질환 예방업무 편람, [http://www.molab.go.kr/], 2004.

노동부, 노동부 고시 제 2003-24호, 2003.

박성준, 제약만족 알고리즘에 기초한 인간공학적 조종패널 배치 시스템의 개발, 박사학위논문, 포항공대, 1995.

박성현, 현대실험 계획법, 민영사, 2003.

이인석, 정민근, 기도형, 김상호, 자동차 조립 작업에서의 전신 자세 불편도 예측 모델, 한국경영과학회, *대한산업공학회 공동 학술대회 논문집*, 792-796, 2002.

이인석, 류형곤, 정민근, 기도형, 복합적인 몸통 자세의 심물리학적 불편도 평가, *대한산업공학회지*, 27(4), 413-423, 2001.

한국산업안전공단, 2003년도 산업재해분석, [http://www.kosha.net],

- 2003.
- 현수돈, 이윤근, 임상혁, 박희석, 자동차 조립 공정에서 작업 특성에 따른 근골격계질환 증상호소율과 관련 요인 분석, *대한인간공학회 춘계학술대회 논문집*, 2002.
- American National Standards Institute, Control of the work-related cumulative trauma disorders, Part 1, Upper extremities, ANSI N-365, 1996.
- Armstrong, T. J., Upper-extremity postures; definition, measurement, measurement and control, in Corlett, E. N., Wilson, J. and Manenica, I. (Eds.), *The ergonomics of working postures: Models, Methods and cases*, Taylor and Francis, London, 59-73, 1986.
- Bernard, B. (Ed.), *Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiological evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and lower back*. DHHS(NIOSH) Publication, 97-141, US Department of Health and Human Services, 1997.
- Cannon, L. J., Bernacki, E. J. and Walter, S. D., Personal Occupational Factors Associated with Carpal Tunnel Syndrome, *J. Occupational Medicine*, 23(4), 255-258, 1981.
- Edril, M. and Dicson, O. B., Cumulative trauma disorders, preventive evaluation, and treatment, *Van Nostrand Reinhold*, 88-89, 1997.
- Eilis, J., Carey and Timothy J. Gallwey, Wrist discomfort levels for combined movements at constant force and repetition rate, *Ergonomics*, 48(2), 171-186, 2005.
- Genaidy, A. M., Al-shedi, A. A. and Karwowski, W., Postural stress analysis in industry. *Applied Ergonomics*, 25, 77-87, 1994.
- Genaidy, A. M., Guo, L., Exkart, R. and Tischbein, D., A postural stress analysis system for evaluating body movements and positions in industry, *Proceedings of Ergonomics Society Conference*, Edinburgh, Scotland, 346-351, 1993.
- Gescheider, G. A., *Psychophysics; Method, theory, and application*(2nd ed), Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1985.
- Han, S. H., Jung, E. S., Kwahk, J. and Park, S., Psychophysical methods and passenger preferences of interior designs, *Applied Ergonomics*, 29(6), 499-506, 1998.
- Han, S. H., Song, M. K. and Kwahk, J. Y., A systematic method for analyzing magnitude estimation data, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 23, 513-524, 1999.
- Hignett, S. and McAtamney, L., Rapid Entire Body Assessment(REBA), *Applied Ergonomics*, 31, 201-205, 2000.
- Hwang, C. L. and Yoon, K., *Multiple Attribute Decision Making: Method and Application*, Springer-Verlag, New York, 1981.
- Ketola, R., Toivonen, R. and Viikari-juntura, E., Interobserver repeatability and validity of an observation method to assess physical loads imposed on the upper extremities, *Ergonomics*, 44(2), 119-131, 2001.
- Li, G. and Buckle, P., Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods. *Ergonomics*, 42, 674-695, 1999.
- McAtamney, L. and Corlett, E. N., RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, *Applied Ergonomics*, 24(2), 91-99, 1993.
- Mital, A. and Kilbom, A., Design, selection and use of hand tools to alleviate trauma of the upper extremities: Part II The scientific basis (knowledge base) for the guide, *International J. Ind. Ergonomics*, 10, 7-21, 1992.
- Moore, J. S. and Garg, A., Upper extremity disorders in a pork processing plant: Relationship between job risk factors and morbidity, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 55, 703-715, 1994.
- Myers, R. H., *Response Surface Methodology*, Blacksburg, Virginia, Virginia Polytechnic Institute and State University 1976.
- NIOSH, Musculoskeletal disorders and workplace factor - A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of neck, upper extremity, and low back, *Control and Prevention*, 1997.
- Putz-Anderson, Vern., *Cumulative Trauma disorders: A Manual for Musculoskeletal Diseases of the Upper Limbs*, Taylor and Francis, New York, 1988.
- Radwin, R. G. and Lin, M. L., An analytical method for characterizing repetitive motion and postural stress using spectral analysis, *Ergonomics*, 36(4), 379-389, 1993.
- Radwin, R. G., Lin, M. L. and Yen, T. Y., Exposure assessment of biomechanical stress in repetitive manual work using frequency-weighted filters, *Ergonomics*, 37(12), 1984-1998, 1994.
- Rohmert, W., Problems of determination of rest allowances, part 2: determining rest allowances in different human tasks. *Applied Ergonomics*, 4(3), 158-162, 1973.
- The Bureau of Labor Statistics, [http://www.bls.gov], 2004.
- Winkel, J. and Mathiassen, S. E., Assessment of physical work load in epidemiologic studies: Concepts, issues and operational considerations. *Ergonomics*, 37, 979-988, 1994.
- Williges, R. C., Development and Use of Research Methodologies for Complex System/Simulation Experimentation, In M. J. Moral and K. F Kraiss, *Manned System Design*, Plenum Press: New York, 1981.
- Yun, M. H., A hand posture measurement system for the analysis of manual tool handling tasks, Unpublished Ph. D. Thesis, Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, Pennsylvania State University, 1994.

## ◎ 저자 소개 ◎

### ❖ 최 광 수 ❖

고려대학교 산업시스템정보공학과(학사)  
고려대학교 산업시스템정보공학과(석사)  
주요관심분야: 인간공학, 제품개발, 안전공학

### ❖ 박 재 규 ❖

한남대학교 산업시스템공학과(학사)  
고려대학교 산업시스템정보공학과(석사 과정)  
주요관심분야: 인체역학, 안전공학, 작업생리

### ❖ 정 의 승 ❖

Pennsylvania State University 산업공학과(인간공학) 공학(박사)  
현재 고려대학교 산업시스템정보공학과 정교수  
주요관심분야: 휴먼모델링, 인간공학/인체역학모델링



---

❖ 최 재 호 ❖

포항공과대학교 산업공학과(박사)  
현재 대진대학교 산업시스템공학과 부교수  
주요관심분야: 인간공학, 감성공학, 제품설계

---

---

논문접수일 (Date Received) : 2005년 04월 26일

논문게재승인일 (Date Accepted) : 2005년 08월 24일