

# Prediction of Whole Body Discomfort on the basis of Hand Position and External Load

Dohyung Kee

Keimyung University, Department of Industrial and Management Engineering, Daegu, 42601

## 손 위치 및 외부 부하에 따른 전신 불편도 예측

기 도 형

계명대학교 경영공학과

### Corresponding Author

Dohyung Kee

Keimyung University, Department of  
Industrial and Management Engineering,  
Daegu, 42601

Mobile : +82-10-5656-1260

Email : dhkee@kmu.ac.kr

Received : December 13, 2018

Revised : December 17, 2018

Accepted : January 09, 2019

Copyright©2019 by Ergonomics Society  
of Korea. All right reserved.

© This is an open-access article distributed  
under the terms of the Creative Commons  
Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which  
permits unrestricted non-commercial use,  
distribution, and reproduction in any medium,  
provided the original work is properly cited.

**Objective:** The purpose of this study is to develop linear models for predicting whole body discomfort and a new external load classification scheme depending upon hand position and external load.

**Background:** Although quantification of whole body discomfort is useful for assessing physical workload, study on whole body discomfort is seldom found. The classification schemes of external load adopted in the existing posture classification methods such as OWAS, RULA, REBA etc. reflect just quantity of external load without considering their locations in the real work postures, which results in inaccurate work stress.

**Method:** An experiment for measuring whole body discomfort was conducted, in which hand position and external load were used as independent variables. The hand position was determined by using percentages of shoulder height and arm distance. Fifteen healthy male college students without histories of musculoskeletal disorders participated in the experiment, whose demographic data are as follows: Age - 21.3 ± 1.80 years; Stature - 175.3 ± 5.88cm; Body weight - 75.5 ± 12.31kg.

**Results:** ANOVA revealed that hand position, i.e. hand vertical height and horizontal distance, external load and their interaction effects are statistically significant on the whole body discomfort at  $\alpha = 0.1$  or 0.01. The effect of external load is the highest, followed by hand horizontal distance, and vertical height. Based on the experimental results, three types of linear models predicting whole body discomfort were proposed, which was classified by independent variables used in the models: hand position and external; angles of joint motions measured for experimental postures; and ROM transformed ratios for angles of joint motions. A new classification scheme of external load reflecting quantity of external load as well as its position was also developed.

**Conclusion:** The study developed three linear modes for predicting whole body discomfort and a new classification scheme of external load.

**Application:** The results of this study are useful for predicting whole body discomfort depending on hand position and external load, and for more precisely assessing work load according to external load.

**Keywords:** Hand position, External load, Whole body discomfort, External load classification scheme

## 1. Introduction

작업 관련성 근골격계질환은 우리나라에서 발생하는 직업병의 약 70% 정도를 차지하고 있으며(Ministry of Employment and Labor, 2017), 주요 유발 요인으로 힘, 자세, 반복 정도 등이 포함된다(Putz-Anderson, 1988). 산업재해 및 다른 직업병과 마찬가지로 근골격계 질환도 예방이 우선되어야 하며, 작업 시 작업자가 느끼는 주관적 불편도를 최소화하면 근골격계질환을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다(Dul et al., 1994; Milner, 1985; Nag, 1991; Putz-Anderson and Galinsky, 1993; Zhang et al., 1996). 주관적 불편도는 사람과 작업 간의 부조화에 대한 전조, 즉 작업 재설계를 요구하는 것으로 해석될 수 있다(Corlett and Bishop, 1976). 이를 바탕으로 Corlett and Bishop (1976)이 개인의 불편도 위치를 확인하기 위한 신체 다이어그램을 사용한 이래 근골격계질환 예방을 위하여 질환 유발 요인에 따른 상대적 불편도를 예측하는 연구가 진행되어 왔다.

Lin et al. (1997)은 작용 힘(exertion), 동작 빈도, 손목 굴곡 동작에 따른 1시간 동안의 등(等) 불편도 곡선(strata of equal discomfort)을 제시하였다. Carey and Gallwey (1999)는 반복적 손 편향 동작과 경과 시간에 따른 불편도 식을 제안하였다. Carey and Gallwey (2002)는 손목 굴곡-신전, 요골 편향-측골 편향과 같은 손목 동작, 속도(pace) 및 작용 힘에 따른 불편도를 측정하는 실험을 수행하여, 큰(extreme) 굴곡 동작이 다른 1자유도 편향 동작(simple type of deviation)에 비하여 큰 불편도를 발생시킴을 밝혔다. 이와 더불어 굴곡과 측골 편향의 복합 동작이 다른 형태의 복합 동작보다 큰 불편도를 낳으며, 작용 힘이 손목 불편도에 가장 큰 영향을 미치고 다음으로 중립에서 벗어난 손목 관절 동작, 속도 순으로 영향을 미친다고 주장하였다.

Genaidy and Karwowski (1993)는 주관적 불편도를 바탕으로 선 자세 및 앉은 자세에서의 인체 주요 관절 -손목, 팔꿈치, 어깨 목과 허리(lower back), 엉덩이, 무릎, 발목-의 동작범위(range of motion: ROM)에 달하는 관절 동작에 대한 불편도 랭킹(ranking) 시스템을 제안하였다. 이에 따르면 엉덩이 외전이 선 자세 관절 동작 중에서 가장 부하가 높고, 엉덩이 굴곡, 팔꿈치 회외(supination)/목 측면 굴곡/엉덩이 신전 동작의 순서로 부하가 컸다. ROM에 달하는 관절 동작만 다룬 문제점을 극복하기 위하여 Genaidy et al. (1994)은 선 자세에서의 상지 및 척추 주위 관절 -손목, 팔꿈치, 어깨 목과 허리(lower back)-의 정적 관절 동작에 대한 불편도에 기초하여 두 개의 랭킹 시스템, 즉 관절 동작별 및 관절별 랭킹 시스템을 제시하였다. 이 랭킹 시스템은 각 관절 동작을 몇 개 수준(예: 손목 동작의 경우 중립, 보통 굴곡, 심한 굴곡, 보통 신전, 심한 신전, 측골 편향, 요골 편향으로 나눔)으로 나누어 지각 불편도를 측정하고, 관절 동작 및 관절별 랭킹을 제안한 점에서 앞의 랭킹 시스템에 비하여 진일보한 것이라 할 수 있다. 그러나 인체에서 일어나는 모든 관절 동작이 아닌 상지와 척추 주변의 대표적 관절 동작만을 다루었다. 이러한 기존 랭킹 시스템의 문제점을 해결하기 위하여 Kee and Karwowski (2003)와 Kee (2005)는 인체에서 일어나는 거의 모든 관절 동작에 대한 관절 동작 및 관절별 남녀 불편도 랭킹 시스템을 발표하였다.

앞서 살펴 본 바와 같이 인체 동작에 대한 주관적 불편도를 측정하고 분석하는 연구가 다수 수행되어져 왔으나, 몇 가지 한계점을 가지고 있다. 첫째, 작업 자세로 인한 근골격계질환을 예방하기 위해서는 관절 동작 뿐 아니라 전신 불편도가 중요하나 기존 연구는 모두 손목, 팔꿈치, 어깨 등과 같은 관절 동작에 국한되어 있다. 둘째, Carey and Gallwey (2002)는 손목 불편도에 힘이 가장 큰 영향을 미친다고 하였으나, 기존 관절 동작 혹은 관절별 랭킹 시스템에는 이에 대한 고려가 없다. 따라서 본 연구에서는 손 위치 및 외부 부하에 따른 전신 불편도를 측정하는 실험을 수행하고, 이를 바탕으로 전신 불편도를 예측하는 모델을 개발하고자 한다. 이와 더불어 실험 결과에 근거하여 불편도에 가장 큰 영향을 미치는 힘, 즉 외부 부하를 평가할 수 있는 분류 체계를 제안한다. 본 연구의 결과는 근골격계질환 예방을 위한 자세 부하 예측에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. Method

### 2.1 Participants

본 연구의 손 위치 및 외부 부하에 따른 전신 불편도 측정에는 과거 근골격계질환 병력이 없는 건강한 15명의 남자 대학생이 참여하였다. 실험 참여자의 신체적 특성은 다음과 같다. 연령 -  $21.3 \pm 1.80$ 세; 신장 -  $175.3 \pm 5.88$ cm; 체중 -  $75.5 \pm 12.31$ kg. 모든 실험 참여자에게는 참여 시간에 따른 수당을 지급하였다.

### 2.2 Experimental design

본 연구의 실험에서 독립변수는 손 위치와 외부 부하로, 종속변수는 주관적 전신 불편도로 하였다. 손 위치는 Miedema et al. (1997)의 정의를 따라 두 가지 변수, 즉 어깨 높이(shoulder height: SH)와 팔 파악 한계(arm reach: AR) 백분율로 정하였다. 어깨 높이는 똑 바로 선 자세에서 바닥에서 어깨점(acromion)까지의 수직 거리로, 팔 파악 한계는 어깨를 90° 굴곡하고 팔을 곧게 편 상태에서 등을 벽에 기대고 똑 바로 선 자세에서 벽에서 손가락 손등점(knuckle)까지의 최대 수평 거리로 정의된다(Figure 1). 언급한 바와 같이 독립변수 손 위치는 어깨 높이에 대한 백분율로 표현되는 손 수직 높이와 팔 파악 한계 백분율로 나타내지는 손 수평 거리로 정하여 진다. Armstrong et al. (1989)에 의하면 자동차 조립 작업에서 사용되는 공구 혹은 도구의 무게가 3kg 이하로 알려져 있으나, 조금 더 무거운 중량물 취급 작업에의 본 연구 결과의 적용성과 실제 실험 참여자가 견딜 수 있는 무게를 고려하여 외부 부하의 최대 무게를 5kg 으로 설정하였다. 외부 부하로는 아령을 사용하였다. 본 연구에서 설정한 독립변수 수준은 Table 1에 정리되어 있다. 실험은 완전요인계 획법을 채택하여 12개 자세, 외부 부하 4수준의 조합 48개 처치(treatment)에 대한 실험을 수행하였다. 모든 실험 참여자별로 실험 처

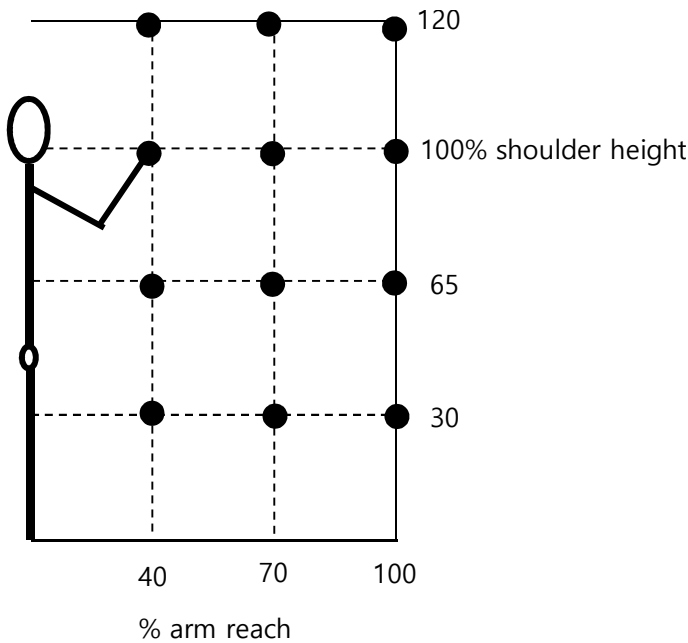


Figure 1. Experimental postures

Table 1. Experimental independent variables and levels

Hand position	Hand height	SH 30%
		SH 65%
		SH 100%
		SH 120%
	Hand distance	AR 40%
		AR 70%
AR 100%		
External load	0, 1, 3, 5kg	

치는 무작위 순서로 제시되었다.

### 2.3 Experimental procedure

실험 수행 전에 모든 실험 참여자에게 실험 목적, 절차 및 실험 도중 발생할 수 있는 위험 요인에 대한 설명을 하고 동의를 구하였다. 실험 참여자는 하의는 운동복과 같이 편한 복장을 착용하고 상의는 탈의하도록 하였다. 실험자는 실험 수행 자세에 대한 관절 각도를 측정할 수 있도록 실험 참여자의 새끼 손가락 가쪽점, 손목, 팔꿈치, 어깨, 엉덩이, 무릎, 복숭아뼈에 마크를 부착하였다. 실험자는 실험 계획 및 순서에 따라 정하여진 손 위치에 철제 포인터를 위치시키고, 실험 참여자는 오른쪽 어깨 가쪽점이 바닥의 검게 표시된 점과 한 수직선에 놓이도록 선 자세를 취한 상태에서 새끼 손가락 가쪽점이 철제 포인터 끝에 닿을 정도로 자세를 취한다. 실험자가 실험 참여자에게 정하여진 외부 부하를 손에 쥐어 주고 실험 참여자의 준비 상태를 확인 후 '시작'을 외친다. 실험 도중 실험자는 실험 후 실험 자세에 따른 관절 각도를 측정할 수 있도록 Figure 2와 같이 실험 참여자 측면 사진을 찍는다. 실험 처치에 따른 자세 유지 시간은 60초이며 60초가 경과하면 실험자가 '끝'을 외치면 실험 참여자는 실험을 종료한다. 실험 종료 후 실험 참여자는 실험 자세를 유지한 60초 동안 느꼈던 불편도를 평가하고 실험 참여자는 이를 기록한다. 실험 참여자에게 실험 간 2분 이상의 휴식 시간을 부여하였고, 실험은 2일에 걸쳐 수행되었다. 불편도 측정 실험 전에 3가지 이상 자세에 대한 연습을 한 후 본 실험을 수행하였고, 실험은 3~3.5시간 정도 소요되었다. 불편도 측정 실험 후 Figure 3에 정의된 관절 동작 중 기존 자료가 있는 관절을 제외한 무릎과 발목 각도에 대한 ROM을 측정하였다.

모든 실험이 끝나면 실험자는 실험 도중 찍은 사진을 이용하여 실험 자세에 대한 팔꿈치, 어깨, 허리, 무릎, 발목 관절 각도를 측정하였다(Figure 3).

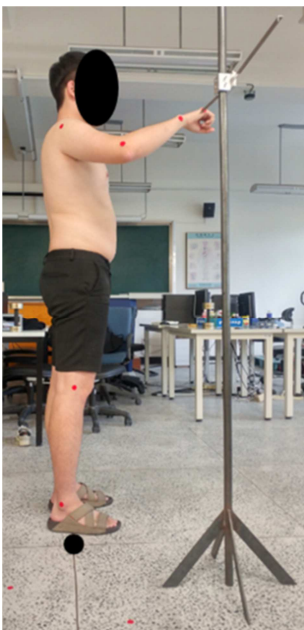


Figure 2. An experimental posture

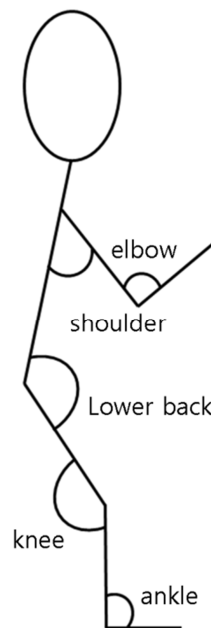


Figure 3. Joint angles measured in this study

### 2.4 Discomfort rating

실험 처치에 따른 불편도 측정에는 실험 결과에 대한 정량적 분석이 가능하도록 Borg CR10을 사용하였다(Borg, 1998). Borg CR10의 불

편도 척도는 Table 2와 같으며 실험 전에 실험 참여자에게 숙지시켰으며, 실험 도중 필요할 경우 수시로 참조할 수 있게 하였다.

**Table 2.** Borg CR 10 scale

Scale	Verbal anchor
0	아무것도 느껴지지 않음(Nothing at all)
0.5	극도로 불편하지 않음(Extremely weak (just noticeable))
1	매우 불편하지 않음(Very weak)
2	불편하지 않음(Weak (light))
3	보통(Moderate)
4	
5	불편함(Strong (heavy))
6	
7	매우 불편함(Very strong)
8	
9	
10	극도로 불편함(Extremely strong (almost max))
Maximal	최대(Absolute maximum (highest possible))

### 3. Results

#### 3.1 ANOVA

실험에서 종속변수로 정한 실험 처치에 따른 전신 불편도에 미치는 독립변수 손 위치, 즉 손 수직 높이 및 수평 거리와 외부 부하의 영향을 분석하기 위하여 분산분석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 3에 정리되어 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 독립변수로 정한 손 수직 높이, 손 수평 거리, 외부 부하 모두 전신 불편도에 유의수준 1%에서 유의한 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 세 독립변수 중 외부 부하의 영향이 가장 컸으며, 손 수평 거리, 손 수직 높이 순으로 영향의 크기가 작게 나타났다. 독립변수 간 교호작용도 모두 유의하였으며, 손 수직 높이 및 수평 거리 간의 교호작용은 유의수준 10%에서 유의하였다. 손 수직 높이 및 수평 거리와 외부 부하 간

**Table 3.** ANOVA results

Source	DF	Mean square	F value	Pr > F
Hand vertical height	3	9.28	105.15	< 0.0001
Hand horizontal distance	2	11.55	130.84	< 0.0001
External load	3	87.22	987.77	< 0.0001
Hand vertical height * Hand horizontal distance	6	0.20	2.27	0.08
Hand vertical height * External load	9	2.53	28.62	< 0.0001
Hand horizontal distance * External load	6	1.11	12.57	< 0.0001
Error	18	1.59		

교호작용은 유의수준 1%에서 전신 불편도에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

### 3.2 Hand vertical height

어깨 높이 비율로 나타내진 손 수직 높이가 지각 불편도에 미치는 영향은 Figure 4에 나와 있다. SNK (Student-Newman Keuls) 검정에서 영향의 크기는 3그룹, 즉 (SH 30%, SH 65%), (SH 100%), (SH120%)로 구분되었다. 그림에서 보는 바와 같이 SH 65%에서 전신 불편도가 가장 낮았고 그 이상에서는 손 위치가 높아질수록 전신 불편도가 거의 선형으로 증가함을 보이고 있다.

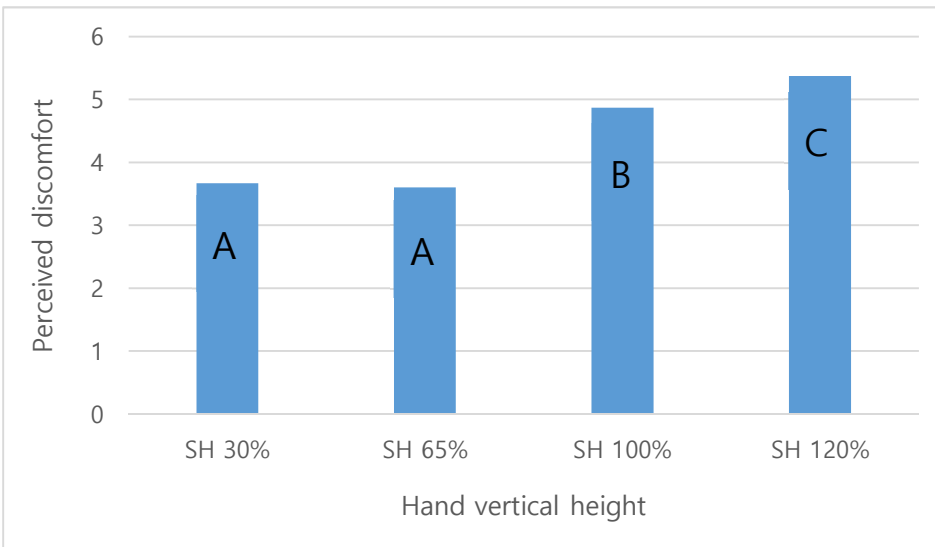


Figure 4. Effect of hand vertical height

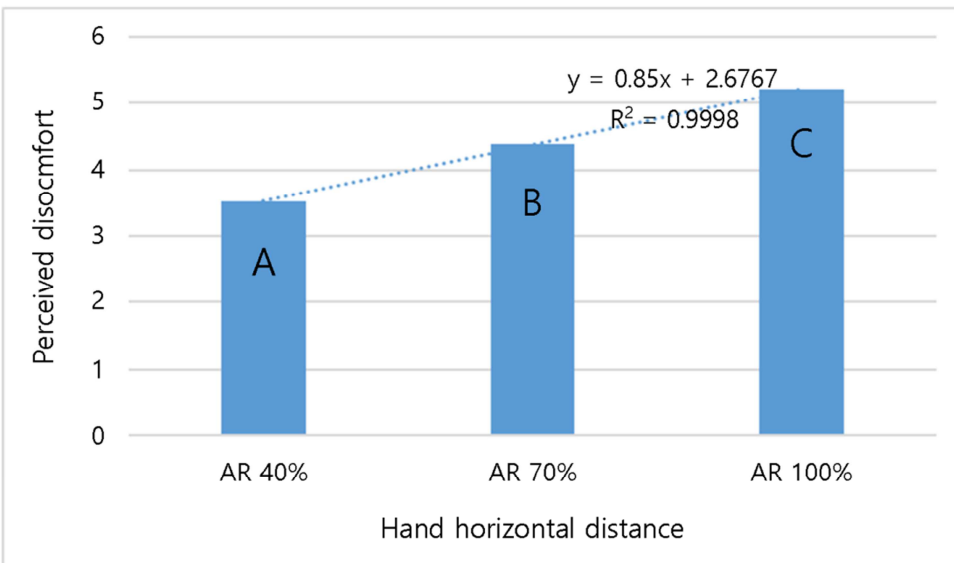


Figure 5. Effect of hand horizontal distance

### 3.3 Hand horizontal distance

손 수평 거리는 팔 파악 한계 백분율로 표현되며 전신 불편도가 손 수평 거리가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다(Figure 5). SNK 검정에서 독립변수 수준별로 3그룹으로 그룹핑되었다.

### 3.4 External load

전신 불편도에 미치는 외부 부하의 수준별 영향의 크기가 Figure 6에 제시되어 있다. 외부 부하 수준에 따라 전신 불편도가 선형적으로 크게 증가하는 추세를 보이고 있다. SNK 검정에서는 외부 부하 수준에 따른 4그룹으로 나누어졌다.

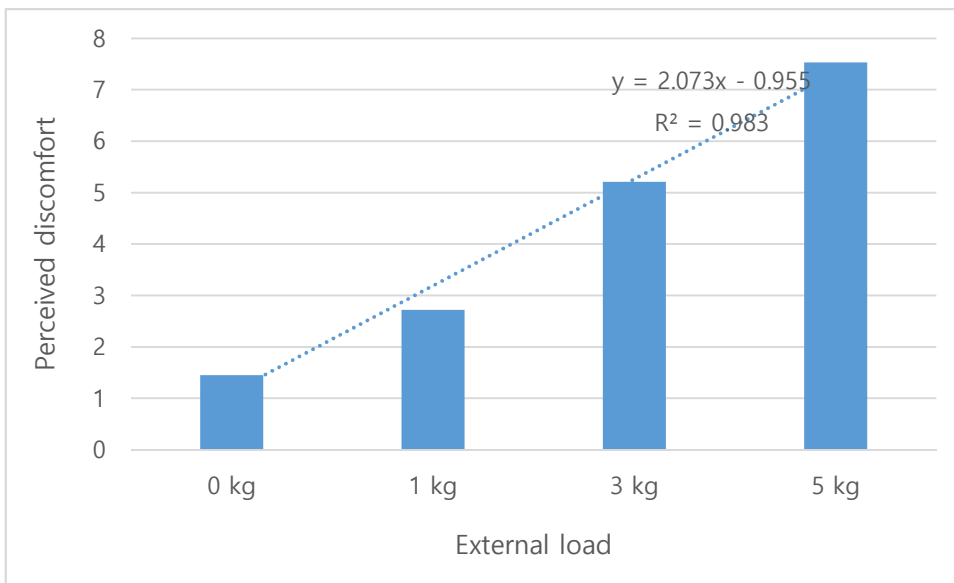


Figure 6. Effect of external load

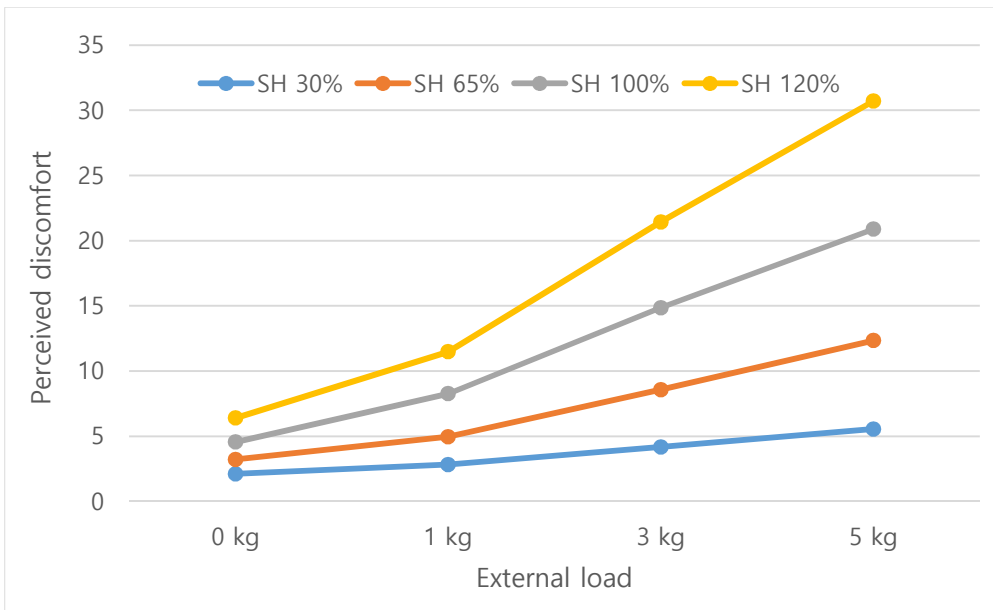
### 3.5 Interaction effects

분산분석에서 유의수준 1%에서 유의하게 나타난 교호작용, 즉 손 수직 높이와 외부 부하, 손 수평 거리와 외부 부하가 전신 불편도에 미치는 영향 정도가 Figure 7에 나타나 있다. 손 수직 높이가 증가할수록 외부 부하가 미치는 영향의 정도가 크고, 외부 부하 수준이 커질수록 손 수직 높이 간 영향 차이도 커짐을 보이고 있다. 손 수평 거리도 손 수직 높이와 같이 손 위치가 몸 중심에서 멀어질수록 외부 부하의 영향이 크고, 외부 부하가 무거울수록 손 수평 거리 간 영향의 차이가 크게 나타났으나 그 차이는 손 수직 높이에 비하여 작았다.

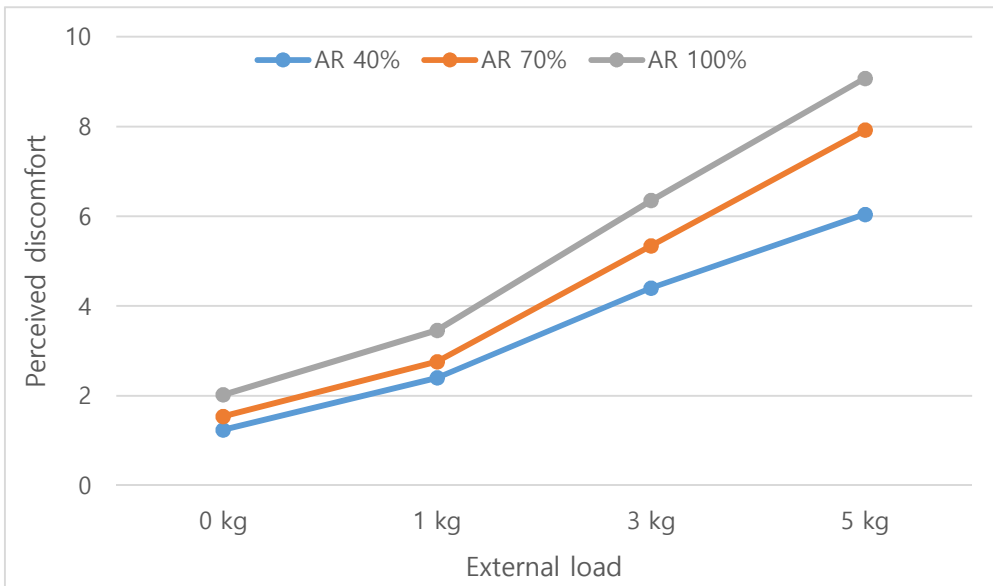
### 3.6 Prediction of whole body discomfort

실험 결과를 바탕으로 3 가지 전신 불편도 예측 모델을 제시한다. 첫째, 분산분석에서 유의수준 1%에서 유의하게 나타난 3개 독립변수, 즉 손 수직 높이, 손 수평 거리, 외부 부하를 독립변수로 한 선형회귀식이다(Table 4). 선형회귀식은 유의수준 1%에서 유의하였고 R<sup>2</sup> 값이 0.89를 보였다. 둘째, 각 실험 자세에서 측정된 관절 각도를 독립변수로 한 선형회귀식이다. 관절 각도에는 팔꿈치, 어깨, 허리, 무릎, 발목이 포함되었으며, 관절 각도 정의는 Figure 3에 나와 있다. 셋째, 각 관절 동작 각도를 그대로 사용하지 않고 ROM 값으로 나눈

변환된 값, 즉 관절 동작 각도/관절 동작별 ROM\*100을 독립변수로 한 선형회귀 모형이다. 팔꿈치, 어깨, 허리ROM 자료는 기존 자료를 이용하였고(Kee and Karwowski, 2001), 무릎과 발목 ROM은 본 연구에서 직접 측정된 자료를 활용하였다(무릎: 127°, 발목: 49°). 관절 각도를 사용한 두 선형회귀식의 R<sup>2</sup> 값은 모두 0.89였다. 비교에는 본 연구의 실험 처치에 따른 자세에 대한 실제 측정된 관절 동작 실제 범위가 제시되어 있다.



(a) Hand vertical height and external load



(b) Hand horizontal distance and external load

Figure 7. Interaction effect between hand vertical height/horizontal distance and external load



**Table 4.** Linear regression equations for predicting whole body discomfort

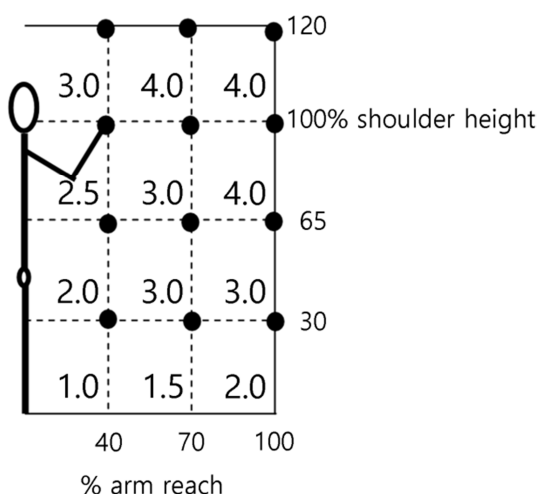
Independent variables	Equation	Model significance	R <sup>2</sup>	Note
SH%, AR%, external load	Discomfort = -1.9481 + 0.0204*SH% + 0.0283*AR% + 1.2156*external load	< 0.0001	0.89	
Joint angles, external load	Discomfort = 0.5620 + 0.0028*elbow + 0.0268*shoulder - 0.0010*back - 0.0435*knee - 0.0978*ankle + 1.2179*external load	< 0.0001	0.89	70° < elbow < 180°, -10° < shoulder < 170°, 70° < back < 180°, 100° < knee < 180°, 60° < ankle < 115°
ROM transformed joint angles, external load	Discomfort = -2.1518 - 0.0036*elbow + 0.0548*shoulder + 0.0022*back - 0.0580*knee + 0.0511*ankle + 1.2196*external load	< 0.0001	0.89	70° < elbow < 180°, -10° < shoulder < 170°, 70° < back < 180°, 100° < knee < 180°, 60° < ankle < 115°

### 3.7 Classification scheme of external load

외부 부하 분류 체계를 개발하기 위하여 먼저, 손 수직 높이와 수평 거리에 대한 12개 각 조합에서 외부 부하의 단위 무게가 전신 불

**Table 5.** Effect of unit external load on whole body discomfort

	Hand vertical height				
		SH 30%	SH 65%	SH 100%	SH 120%
Hand horizontal distance	AR 40%	0.45 (1.0)	0.86 (2.0)	1.10 (2.5)	1.41 (3.0)
	AR 70%	0.68 (1.5)	1.25 (3.0)	1.48 (3.0)	1.71 (4.0)
	AR 100%	0.92 (2.0)	1.31 (3.0)	1.70 (4.0)	1.71 (4.0)



**Figure 8.** Classification scheme of external load

편도에 미치는 영향을 구하였다. 즉, 12개 조합별로 전신 불편도를 종속변수로, 외부 부하를 독립변수로 하는 단순 회귀식의 기울기를 구하였다(Table 4). 이렇게 한 이유는 분산분석에서 손 수직 높이 및 수평 거리와 외부 부하 간 교호작용이 유의하여, 손 수직 높이와 수평 거리 조합별로 외부 부하의 영향이 다를 것으로 추정되기 때문이다. 다음으로 기울기 값 중 최소값을 기준으로 한 최소 변환, 즉 해당 기울기 값/최소 기울기 값을 계산하여 소수점 이하 부분을 반올림하는 방식으로 정규화하였다(Table 5 괄호 안 수치, Figure 8 사각형 안 수치).

#### 4. Discussion

본 연구에서는 손 위치 및 외부 부하 크기에 따른 전신 불편도 예측 모델을 제시하였다. 인체 일부 관절 및 관절 동작별 불편도와 이들의 랭킹을 다룬 연구는 수행되어 왔으나, 전신 불편도를 다룬 연구를 찾기 힘든 상황에서 전신 불편도 예측 모델을 제시한 본 연구는 의의가 있다 할 수 있다. 기존 연구에서와 같이 관절 각도로 실험 자세를 조정할 경우 거의 무한의 자세가 존재하여 실험 수행이 현실적으로 불가능하나, 본 연구의 실험에서는 실험 자세를 손 위치, 즉 Miedema et al. (1997)이 제시한 어깨 높이 및 팔 파악 한계 백분율로 조정하여, 작업 현장에서 관찰되는 대부분의 작업영역이 포함되도록 하였다(Figure 1 참조). 또 전신 불편도 측정에는 Borg CR10을 사용하여 제시된 예측 모델을 이용하여 추정된 자세에 따른 불편 정도를 쉽게 해석할 수 있게 하였다.

앞서 전신 불편도를 예측하는 세 가지 모형, 즉 실험 계획에 사용된 세 독립변수(손 수직 높이, 손 수평 거리, 외부 부하)를 이용한 회귀 모형, 관절 각도를 이용한 두 가지 회귀식을 제안하였다. 이 중 실험 독립변수를 사용한 모델에서는 3가지 독립변수의 단순 요인만 포함하고 교호작용은 고려하지 않았다. 분산분석에서 독립변수 간 교호작용이 유의한 것으로 나타나, 이들을 모델에 포함할 경우 더 좋은 예측 모델이 될 수 있다. 그러나 교호작용을 모델에 포함할 경우 선형회귀식에서 이들의 영향으로 손 수직 높이와 외부 부하에 대한 계수가 음으로 나와(실제는 양수값이어야 할 것으로 추정됨) 그 의미의 해석이 어려울 뿐만 아니라, 이들을 포함하여도 단순 요인만 포함한 모델에 비하여  $R^2$  값이 0.08 정도만 커져 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 모델에 포함된 손 수직 높이와 외부 부하 계수가 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 점을 고려할 때 본 연구에서 제시한 단순 요인만 사용한 모델이 타당하다 할 수 있다.

관절 각도를 이용한 첫번째 모형은 주어진 손 위치에 따른 자세의 팔꿈치, 어깨, 허리, 무릎, 발목 굴곡 동작 각도를 독립변수로 사용하였다. 이렇게 할 경우 각 관절 동작의 ROM이 달라 단위 동작이 불편도에 미치는 영향이 관절 동작별로 다를 수 있다. 예를 들어, 어깨 굴곡 동작 ROM은  $194^\circ$ 이나 발목 동작의 ROM은  $49^\circ$ 로 작아, 어깨 굴곡  $1^\circ$ 와 발목 동작  $1^\circ$ 가 지각 불편도에 미치는 영향이 다를 것으로 추정된다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 각 실험 자세에서 측정된 관절 동작을 각 관절 동작의 ROM으로 나눈 값, 즉 ROM에 대한 비율로 변환한 값을 독립변수로 하는 선형회귀식을 제안하였다.

전신 불편도를 추정하는 세 가지 모형은 모두  $R^2$  값이 0.89 이상으로 높게 나타났으나, 관절 각도를 이용한 두 모델은 독립변수로 사용한 관절 각도가 선형회귀식에서 유의하지 않은 것이 많았다. 관절 각도를 사용한 두 모형에서 모두 어깨 각도만 유의수준 1%에서 유의하였다. 또한, 관절 동작에 대한 불편도를 바탕으로 제시된 기존 랭킹 시스템에서는 팔꿈치 - 어깨/허리/무릎 - 발목 순서로 불편도 랭킹이 높아졌으나(Kee and Karwowski, 2003), 본 연구의 두 모형에서는 이와는 다른 결과를 보였다. 즉, 관절 각도를 그대로 독립변수로 한 모형에서는 발목 - 무릎 - 어깨 - 팔꿈치 - 허리 순으로, ROM으로 나눈 변환된 관절 각도 비율을 사용한 회귀식에서는 무릎 - 어깨 - 발목 - 팔꿈치 - 허리 순으로 단위 관절 각도 혹은 단위 비율이 불편도에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한, 관절 각도를 이용한 첫 번째 모형에서는 팔꿈치, 어깨 각도와 외부 부하가 증가하고 허리, 무릎, 발목 각도가 감소할수록, 두 번째 모형에서는 팔꿈치, 어깨, 허리, 발목 각도와 외부 부하가 증가하고 무릎 각도는 감소할수록 불편도가 증가한다. 그러나 어깨 각도는 증가하고 허리, 무릎 및 발목 각도는 감소할수록 중립 자세에서 멀어져, 자세 부하가 커질 것으로 추정되나(Figure 3 참조), 두 번째 모형에서는 허리, 발목의 경우 각도가 증가할수록 불편도가 증가하여 실제 부하와 반대 추세를 보이고 있는 문제가 있다. 실제 예측 모델을 사용할 때 관절 각도 측정보다 어깨 높이 및 팔 파악 한계 비율로 나타내지는 손 수직 높이 및 손 수평 거리 값의 측정 혹은 추정이 쉬울 것으로 보여, 관절 각도에 기반한 모델보다 실험에서 사용한 세 독립변수를 이용한 예측 모형이 사용하기 용이할 것으로 보인다. 이러한 점과 예측 모형에서 사용한 세 독립변수가 모두 유의하게 나타난 점을 고려할 때 손 수직 높이, 손 수평 거리 및 외부 부하를 독립변수로 한 회귀 모형이 전신 불편도를 예측하는 모형으로 좀 더 적절할 것으로 판단된다.

작업 부하에 외부 부하 혹은 취급 중량물의 무게가 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있고 본 연구의 결과도 3가지 독립변수 중 영향이 가장 컸으나(Kee, 2004; Ryu et al., 2005), OWAS (Karhu et al., 1977), RULA (McAtamney and Corlett, 1993), REBA (Hignett and McAtamney, 2000) 등의 기존 관찰적 자세 부하 평가 기법에서는 자세에 관계없이 외부 부하의 크기만으로 부하를 평가하고 있다. 즉, OWAS에서는 0~10kg, 10~20kg, 20kg ~, RULA에서는 0~2kg, 2~10kg, 10kg ~, REBA에서는 0~5kg, 5~10kg, 10kg ~과 같이 외부 부하를 몇 개 구간으로 나누고 그 크기만 고려하고 있다. 그러나 본 연구의 분산분석(Table 3)에서 손 수직 높이 및 수평 거리와 외부 부하 간 교호작용이 유의하여 손 위치, 즉 자세에 따라 외부 부하의 영향이 다름을 암시하고 있다. 따라서 언급한 기존 자세 부하 평가 기법이 외부 부하의 영향을 바르게 평가하고 있다고 하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 실험 결과를 바탕으로 손 위치에 따른 외부 부하 분류 체계를 제안하여, 외부 부하를 좀 더 정확하게 평가할 수 있게 하였다(Table 5, Figure 8). 또한, 본 연구에서 제안한 자세 분류 체계는 비율 척도로 표현되어 있어 손 위치에 따른 외부 부하 영향의 크기를 직접 비교할 수 있게 하였다.

산업 현장에서 사용되는 대부분 공구 무게가 3kg 이하로 알려져 있으나(Armstrong et al., 1989), 실제 산업 현장에서 이루어지는 중량물 취급 작업에의 적용성과 함께 실험 시 안전성을 고려하여 본 연구의 실험에서 외부 부하 크기를 최대 5kg으로 하였다. 실험 참여자는 실험 도중 위험을 느낄 경우 실험을 포기할 수 있도록 하였는데 실제 실험 포기 횟수가 3회에 달하였다: SH 120%~13회; SH 100%~15회; SH 65%~2회. 30회 실험 포기 중 외부 부하가 3kg일 경우는 3회이고 나머지는 모두 5kg인 경우였다. 이로 미루어 볼 때 외부 부하 크기를 5kg을 초과하여 설정하는 것은 무리임을 알 수 있으며, 본 연구에서 설정한 외부 부하 크기 한계(5kg) 설정이 적절하였다고 할 수 있다. 본 연구 실험이 오른손으로만 실행되어 본 연구 결과를 한 손 5kg, 양 손 10kg의 외부 부하까지 적용 가능하여, 큰 중량물 취급 작업이 아닌 대부분의 작업 평가에 본 연구 결과를 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

NIOSH 들기 작업 공식에서 수직 높이(vertical location)의 최대 값을 175cm로 제한하고 있는 점을 고려할 때(Waters et al., 1993), 본 연구의 독립변수 중 손 수직 높이를 최대 SH 120%(실험 참여자 평균값: 174.6cm)로 정한 것은 타당하다 할 수 있다. 그러나 NIOSH 들기 작업 공식에서 수직 높이가 주먹(knuckle) 높이, 약 75cm일 때가 수직 계수(vertical multiplier)가 1.0으로 최대가 되나, 본 연구에서는 이에 가까운 손 수직 높이 수준(약 SH 50%)이 포함되지 않아 전신 불편도가 최저가 되는 점을 제시하지 못하였다. 이를 포함하면 좀 더 정확한 손 수직 높이에 대한 영향의 크기 및 경향을 파악할 수 있어, 추후 이에 대한 연구가 요망된다.

## 5. Conclusion

본 연구는 어깨 높이 및 팔 파악 한계 백분율로 정의되는 손 위치와 외부 부하에 대한 전신 불편도를 측정하는 실험을 수행하고, 실험 결과를 바탕으로 실험에서 설정한 독립변수가 전신 불편도에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한, 손 위치, 즉 손 수직 높이 및 수평 거리와 외부 부하에 따른 전신 불편도 예측 모델과 외부 부하 분류 체계를 개발하였다. 분산분석에서 외부 부하가 가장 큰 영향을 미치고, 손 수평 거리, 손 수직 높이 및 독립변수 간 교호작용의 영향이 유의한 것으로 나타났다. 외부 부하 및 손 수평 거리는 변수 수준이 높아짐에 따라 전신 불편도가 선형적으로 증가하였다. 본 연구에서 개발된 외부 부하 분류 체계는 외부 부하의 크기와 더불어 외부 부하가 놓여 있는 위치도 고려하여 기존 자세 부하 평가 기법보다 좀 더 정확하게 부하를 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

## Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2017R1D1A1B03028532).

## References

- Armstrong, T., Punnett, L. and Ketner, P., Subjective worker assessment of hand tools used in automobile assembly, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 50, 639-645, 1989.
- Borg, G., Borg's perceived exertion and pain scales, Human Kinetics, IL, USA, 1998.

- Carey, E.J. and Gallwey, T.J., Discomfort prediction from postural deviations of the wrist. In M.A. Hanson, E.J. Lovesey, S.A. Robertson (Ed), *Contemporary Ergonomics 1999*, Taylor & Francis, London, 296-300, 1999.
- Carey, E.J. and Galley, T.J., Effects of wrist posture, pace and exertion on discomfort, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29, 85-94, 2002.
- Corlett, E.N. and Bishop, R.P., A technique for assessing postural discomfort, *Ergonomics*, 19, 175-182, 1976.
- Dul, J., Douwes, M. and Smitt, P., Ergonomics guidelines for the prevention of discomfort of static postures can be based on endurance data, *Ergonomics*, 37, 807-815, 1994.
- Genaidy, A.M., Al-Shedi, A.A. and Karwowski, W., Postural stress analysis in industry, *Applied Ergonomics*, 25, 77-87, 1994.
- Genaidy, A.M. and Karwowski, W., The effects of neutral posture deviation on perceived joint discomfort ratings in sitting and standing postures, *Ergonomics*, 36, 785-792, 1993.
- Hignett, S. and McAtamney, L., Rapid Entire Body Assessment (REBA), *Applied Ergonomics*, 31, 201-205, 2000.
- Karhu, O., Kansj, P. and Kuorinka, I., Correcting working postures in industry: A practical method for analysis, *Applied Ergonomics*, 8(4), 199-201, 1977.
- Kee, D., Gender differences in rankings of joint motion stressfulness based on psychophysical scaling, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, 461-469, 2005.
- Kee, D., Investigation on Perceived Discomfort Depending on External Load, Upper Limb Postures and their Duration, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 30(2), 76-83, 2004.
- Kee, D. and Karwowski, W., Ranking systems for evaluation of joint motion stressfulness based on perceived discomforts, *Applied Ergonomics*, 34(2), 167-176, 2003.
- Kee, D. and Karwowski, W., The Boundaries for Joint Angles of Isocomfort for Sitting and Standing Males Based on Perceived Comfort of Static Joint Postures, *Ergonomics*, 44(6), 614-648, 2001.
- Lin, M.L., Radwin, R.G. and Snook, S.H., A single metric for quantifying biomechanical stress in repetitive motions and exertions, *Ergonomics*, 40, 543-558, 1997.
- 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.
- Miedema, M.C., Douwes, M. and Dul, J., Recommended maximum holding times for prevention of discomfort of static standing postures, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19, 9-18, 1997.
- Milner, N., *Modeling fatigue and recovery in static postural exercise*, Ph.D. thesis, University of Nottingham, Nottingham, 1985.
- Ministry of Employment and Labor, Industrial accident analysis, 2017.

Nag, P.K., Endurance limits in different models of load holding, *Applied Ergonomics*, 22, 185-188, 1991.

Putz-Anderson, V., *Cumulative trauma disorders: a manual for musculoskeletal diseases of the upper limbs*, Taylor & Francis, London, 1988.

Putz-Anderson, V. and Galinsky, T.L., Psychophysically determined work durations for limiting shoulder girdle fatigue from elevated manual work, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 11, 19-28, 1993.

Ryu, T., Na, S., Chung, M.K. and Kee, D., Evaluation of Varying Shoulder Postures with External Loads using a Psychophysical Method, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 24(2), 9-16, 2005.

Waters, T.R., Putz-Anderson, V. and Fine, L.J., Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks, *Ergonomics*, 36(7), 749-776, 1993.

Zhang, L., Helander, M.G. and Drury, C.G., Identifying factors of comfort and discomfort in sitting, *Human Factors*, 38, 377-389, 1996.

## Author listings

**Dohyung Kee:** dhkee@kmu.ac.kr

**Highest degree:** Ph.D, Department of Industrial Engineering, POSTECH

**Position title:** Professor, Department of Industrial and Management Engineering, Keimyung University

**Areas of interest:** Systems ergonomics, Population stereotype, Product design, Posture classification scheme, Industrial safety, Musculoskeletal disorders