JESK J Ergon Soc Korea 2026; 45(1): 27-37
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2026.45.1.27
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Analysis of Upper Body Workload by Physical Characteristics and Task Types: Comparative Evaluation of Postural Load according to Gender, Body Mass Index, and Task Conditions

Ji Ung Kim, Minseok Son

Chungbuk National University, Department of Safety Engineering, Cheongju, 28644

신체적 특성과 작업 유형에 따른 상체 작업부하 분석: 성별, 체질량지수, 작업 조건에 따른 자세 부하 비교 평가

김지웅, 손민석

충북대학교 안전공학과

Corresponding Author
Minseok Son
Chungbuk National University,
Department of Safety Engineering,
Cheongju, 28644
Email : m.son@cbnu.ac.kr

Received : January 07, 2026
Revised : February 05, 2026
Accepted : February 19, 2026

Copyright@2026 by The Human Factors & Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: The purpose of this study is to quantitatively examine differences in musculoskeletal load according to physical characteristics under identical RULA scores, and to evaluate the limitations of the conventional RULA system.

Background: Work-related musculoskeletal disorders are representative occupational diseases caused by repetitive or awkward working postures. In industrial settings, observational posture assessment methods such as RULA, REBA, and OWAS are commonly used, among which RULA has high practical applicability for upper-limb–intensive tasks. However, conventional RULA does not consider individual physical characteristics such as sex and body mass, which may lead to different levels of actual musculoskeletal load even for identical RULA scores. Therefore, it is necessary to examine the validity of the existing RULA and explore its potential for improvement.

Method: This study included 20 healthy adults aged 20~39 years (10 males and 10 females), who were classified into normal-weight and overweight groups based on body mass index. Participants performed six upper-limb–dominant postures corresponding to RULA Action Levels 2~4 under single, repeated, and sustained task conditions. Subjective upper-limb workload was assessed using the Borg CR-10 scale after each task, and surface electromyography was recorded for a subset of eight participants. Data were analyzed using correlation analysis and repeated-measures mixed ANOVA to examine the effects of RULA score, task type, sex, and BMI on musculoskeletal load.

Results: RULA scores showed significant positive correlations with perceived workload across all task conditions; however, the strength of these correlations remained moderate, indicating limitations in explaining actual musculoskeletal load based on RULA scores alone. In addition, subjective workload and electromyographic responses differed significantly by sex and BMI even within identical postures, with sex-related differences in load patterns being more pronounced than body-type differences under repeated and sustained task conditions. Furthermore, perceived workload consistently increased from single to repeated and sustained tasks, and non-linear responses were observed in which some load-handling postures with RULA scores of 5~6 elicited greater workload than postures scored as 7.

Conclusion: This study showed that RULA scores alone are insufficient to fully represent actual musculoskeletal load. Gender and task execution characteristics, particularly repeated and sustained tasks, substantially influenced by workload responses. These findings highlight the need to extend RULA by incorporating individual physical characteristics and task-specific factors.

Application: The findings of this study may be used to refine RULA-based assessments and support practical strategies for preventing work-related musculoskeletal disorders in industrial settings.

Keywords: RULA, Borg CR-10 scale, Electromyography, Gender, BMI

1. Introduction

작업성 근골격계 질환(Work-related Musculoskeletal Disorders, WMSDs)은 과도한 힘, 부적절하거나 지속적인 작업 자세, 반복 동작, 정적 부하 등 작업 요인과 개인의 신체적 특성이 복합적으로 작용하여 발생하는 대표적인 직업성 질환이다(Hagberg, 1995). 제조업, 건설업, 운송·물류업과 같은 고위험 산업에서는 근골격계 질환의 발생률이 여전히 높게 유지되고 있으며, 최근에는 고령화, 운동 부족, 비만과 같은 개인적 요인이 근골격계 부담을 더욱 증폭시키는 것으로 보고된다(Ding et al., 2023; Viester et al., 2013). 이러한 근골격계 질환의 증가는 개인의 건강 문제를 넘어 의료비 및 보상 비용 증가, 조직 생산성 저하, 삶의 질 감소 등 사회·경제적 손실로 이어져, 예방 중심의 체계적인 관리가 산업안전보건 분야의 핵심 과제로 인식되고 있다(Chaffin et al., 2006; Karwowski and Marras, 2003).

국내 산업재해 통계에서도 이러한 경향은 뚜렷하게 나타난다. 최근 3년간 근골격계 질환자 수는 지속해서 증가하고 있으며, 이는 제도적 규제와 예방 활동이 강화되었음에도 산업현장에서 수행되는 작업 자세 평가와 개선 절차가 실제 근골격계 부담을 충분히 반영하지 못하고 있음을 시사한다. 따라서 근골격계 질환의 효과적인 예방을 위해서는 부적절한 작업 자세로 인한 근골격계 부담을 보다 정밀하게 평가할 수 있는 근골격계 유해요인조사 평가 체계의 고도화가 요구된다.

산업현장에서는 근골격계 질환 예방을 위해 관찰 기반 평가 기법이 널리 활용되고 있으며, 그 중 RULA (Rapid Upper Limb Assessment)는 조립, 의료 등 상체 부담이 큰 작업 환경에서 높은 활용도를 보인다(McAtamney and Corlett, 1993). Kee and Park (2005)에 따르면, RULA는 상체 중심 작업에서 OWAS 및 REBA에 비해 실제 근골격계 부담을 보다 민감하게 반영하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그럼에도 RULA는 정적 자세 평가를 기반으로 하여 반복 동작이나 누적 피로와 같은 시간적 특성을 충분히 반영하지 못하며, 평가자의 숙련도와 피평가자에 따라 결과의 신뢰도가 달라질 수 있다는 구조적 한계를 내포하고 있다. 특히 성별, 체질량지수와 같은 신체적 특성이 평가 체계에 반영되지 않기에 동일한 자세에서도 주관적 작업부하나 실제 근전도 반응은 개인별로 다르게 나타날 수 있다. 또한, 이러한 한계는 RULA 적용 시 실제 근부하의 과소·과대 평가 가능성을 내포한다는 점에서 중요한 문제로 지적된다.

이에 본 연구에서는 산업현장에서 상체 중심 작업 평가에 널리 활용되고 있는 RULA를 연구 대상으로 선정하고, 신체적 특성에 따른 작업부하 차이를 주관적 작업부하와 근전도 지표를 통해 실험적으로 검증하고자 한다. 이를 통해 기존 RULA의 구조적 한계를 규명하고, 신체적 특성을 고려한 작업 자세 평가 체계로의 개선 가능성을 탐색하는 것을 본 연구의 목적으로 한다.

본 연구의 목적을 달성하기 위하여 연구 가설은 다음과 같이 설정하였다.

- 가설1. RULA 점수는 주관적 작업부하와 유의한 양의 상관관계를 가질 것이다.
- 가설2. 작업 자세에 따라 성별 및 BMI 그룹에 따른 주관적 작업부하 및 근전도 반응에 유의한 차이가 존재할 것이다.
- 가설3. 동일한 작업 자세에서 수행 방식(단일, 반복, 유지)에 따라 주관적 작업부하는 유의하게 다를 것이다.

2. Method

2.1 Participants

본 연구는 만 20세 이상 39세 이하의 건강한 성인 남녀 20명(남성 10명, 여성 10명)을 대상으로 수행하였다. 연구 대상자의 평균 연령은 27.2세(범위: 20~36세, 표준편차: 5.4)였으며, 평균 체질량지수(Body Mass Index, BMI)는 24.6kg/m^2(범위: 17.6~37.0kg/m^2, 표준편차: 4.6)이었다. BMI는 WHO 기준(아시아권 적용)에 따라 정상 체중 그룹(BMI<25kg/m^2), 과체중 그룹(BMI≥25kg/m^2)으로 구분하여 모집하였다.

모든 연구 대상자는 근골격계 및 신경계 질환의 병력이 없고, 실험을 진행하기 전 연구 목적과 절차를 충분히 설명 들은 후 자발적으로 참여 동의서를 작성하였다. 본 연구의 자료 수집 절차는 충북대학교 생명윤리위원회(IRB)의 승인을 받았으며, 승인번호는 CBNU-2025-A-0125이다.

2.2 Experimental tasks

본 연구에서는 세 가지 실험 과제를 설정하였으며, 수행 방식에 따라 단일 수행(Single), 반복 수행(Repeated), 유지 수행(Sustained)으로 구분하였다. 각 실험 과제에서는 RULA Action Category 2~4에 해당하는 상지 중심의 좌우 대칭 작업 자세 6가지를 고려하였다(Table 1). 본 연구에서는 RULA의 Action Level 체계를 기반으로 하되, 실험 설계 및 비교 분석의 용이성을 위해 이를 Action Category로 재정의하여 사용하였다. 또한, Action Category 1은 개선 조치가 불필요한 단계로 분류되므로 분석의 타당성을 확보하기 위하여 제외하였다.

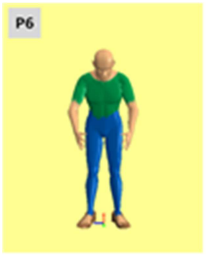
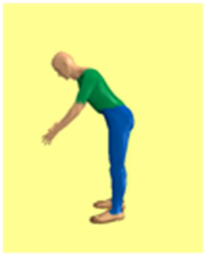
- 단일 수행 과제(Single Task): 각 자세를 5초간 유지, 1회 수행
- 반복 수행 과제(Repeated Task): 각 자세를 5초간 유지, 연속 10회 수행
- 유지 수행 과제(Sustained Task): 각 자세를 1분간 정적으로 유지

각 참가자는 각 실험 과제 내에서 6개 작업 자세 각각에 대해 1회씩 실험을 수행하였다. 이에 따라 모든 참가자는 세 가지 수행 방식에서 동일한 6가지 작업 자세를 모두 실시하였으며, 총 18회의 실험을 수행하였다(3개의 수행 방식 × 6개의 작업 자세). 이러한 과제 구성은 동일한 Action Category 작업 자세에서도 수행 방식에 따른 근골격계 부담 차이를 체계적으로 비교·분석할 수 있도록 설계되었다.

Table 1. The 6 upper body postures

RULA	Posture			
Action category	Front view	Side view	Front view	Side view
AC 2				
	Standing posture with the trunk fixed at approximately 90°, shoulders flexed at approximately 45°, and the neck flexed at approximately 20°.		Standing posture with the trunk fixed at approximately 90°, shoulders flexed at approximately 100°, and the neck extended at approximately 5°.	

Table 1. The 6 upper body postures (Continued)

RULA	Posture			
Action category	Front view	Side view	Front view	Side view
AC 3				
	Standing posture with a 5kg load statically supported at the abdominal level.		Standing posture with a 5kg load supported at the abdominal level and the trunk rotated approximately 30° to the left (or right).	
AC 4				
	Standing posture with the trunk fixed at approximately 90°, shoulders flexed at approximately 150°, and the neck extended at approximately 40°.		Posture with the lower limb joints not flexed, shoulders flexed at approximately 50°, and the trunk flexed at approximately 60°.	

2.3 Experimental procedures

모든 실험은 피로 누적을 방지하기 위하여 충분한 휴식 시간을 포함하여 진행되었으며, 각 실험 과제 사이에는 최소 30분 이상의 휴식 시간을 제공하였다. 이 휴식 시간은 근육 피로 및 회복 특성에 관한 선행연구를 근거로 설정되었다(Barbonis, 1978; Milner, 1986; Miller et al., 1987; Jones et al., 2006). 모든 참가자는 동일한 기간과 절차에 따라 실험에 참여하였다.

RULA 점수 산출은 작업 자세 평가 기법에 대한 연구 경험을 보유한 연구자 2인이 수행하였다. 각 평가자는 RULA 지침(McAtamney and Corlett, 1993)에 제시된 자세 분류 기준에 따라 독립적으로 작업 자세를 평가하였다. 작업 자세 평가는 사전에 3DSSPP를 활용하여 설정된 표준 자세를 기준으로 수행되었으며, 실험 과정에서는 해당 자세가 유지되도록 연구자가 지속적으로 모니터링하고 필요 시 자세를 조정하였다. 평가자 간 점수 차이가 발생한 경우에는 RULA 기준에 근거하여 해당 자세의 관절 각도 및 작업 특성을 재검토한 후 상호 논의를 거쳐 최종 RULA 점수를 결정하였다.

각 작업 자세는 시각적 기준선을 이용하여 관절 각도 오차를 통제하였으며(Figure 1), 연구자는 실험 과정 동안 참가자의 자세를 정면 및 측면에서 관찰하며 필요한 시 즉각적인 교정을 제공하였다. 실험에 사용된 중량물은 근골격계에 과도한 부담이 가해지지 않도록 「산업안전보건기준에 관한 규칙」에 따라 최소 중량물 기준인 5kg으로 설정하였다.

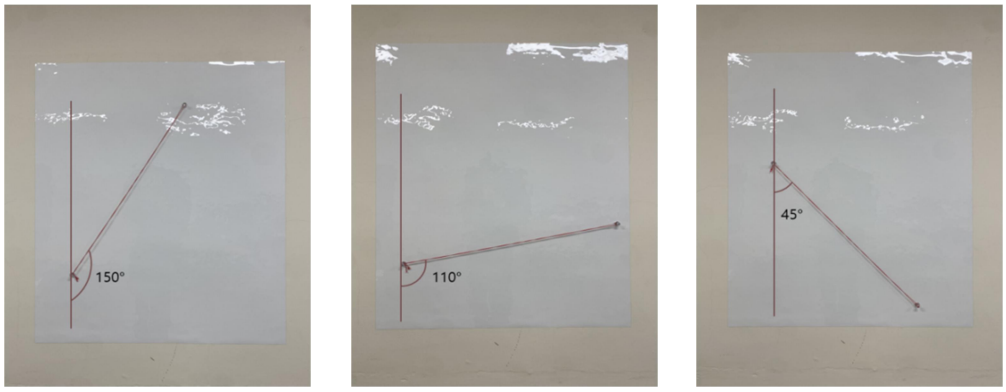


Figure 1. Experimental base line

각 실험 직후 참가자는 Borg CR-10 scale을 이용하여 주관적 작업부하를 평가하였다. 근전도 측정은 장비 착용 및 데이터 수집에 소요되는 시간과 실험 피로도를 고려하여 전체 참가자 중 일부를 대상으로 수행하였으며, 본 연구의 보조적인 평가수단으로 활용하였다. EMG 측정 대상자는 성별과 BMI 집단을 고려한 층화 표집(Stratified sampling) 방식으로 선정하였으며, 정상체중 및 과체중 집단에서 남성 4명, 여성 4명으로 총 8명을 구성하였다. EMG 측정에 참여한 대상자는 전체 참가자와 동일한 선정 기준을 충족하였으며, 성별과 체질량지수 분포를 균형 있게 반영함으로써 표본의 대표성을 확보하고자 하였다.

근전도 신호 수집을 위해 Noraxon MR 3.20.68 (Noraxon USA Inc., USA)을 사용하였다. 전극은 전완 굴곡근, 전완 신전근, 상완 이두근, 상완 삼두근, 전면·측면·후면 삼각근, 상부 승모근, 기립근 등 총 9개 근육 부위에 부착하였으며, 전극 부착 전에는 피부 저항을 최소화하기 위하여 부착 부위를 면도한 후 알코올 솜으로 세정하였다.

2.4 Data analyses

각 실험 조건에서 수집된 주관적 작업부하(Borg CR-10 scale)와 근전도 지표는 통계 분석을 위해 전처리되었다. 근전도 신호는 20~400Hz 필터링을 적용한 후 전파 정류(Full-wave Rectification)하였으며, 200ms 이동 구간을 적용한 RMS (Root Mean Square) 처리 과정을 거쳐 분석에 사용하였다. 근활성도는 근육 간 비교를 위해 최대 자발적 수축(Maximum Voluntary Contraction, MVC)을 기준으로 정규화(Normalize)하여 %MVC로 산출하였다. MVC 측정은 각 근육에 대해 5초간의 최대 등척성 수축을 3회 반복 측정하였으며, 측정된 값 중 가장 큰 RMS 값을 해당 근육의 MVC 기준 값으로 사용하였다. 동일한 RULA 점수 그룹에 포함되는 세 가지 작업 자세에 대해서는 각 종속 변수별 평균값을 산출하여 분석에 활용하였다. 전체 자료 중 결측치는 5% 미만으로 확인되었으며, 해당 값은 분석에서 제외하였다.

RULA 점수와 주관적 작업부하 간의 관계를 확인하기 위해 상관분석을 하였다. 또한, 성별 및 BMI 집단에 따른 근골격계 부담 차이를 검증하기 위해 작업 자세를 개체-내 요인으로 하고, 성별과 BMI 집단을 개체-간 요인으로 설정한 반복측정 혼합 분산분석을 수행하였다. 해당 분석은 단일 수행, 반복 수행, 유지 수행 과제별로 각각 적용되었다.

수행 방식에 따른 주관적 작업부하의 차이를 비교하기 위해 수행 방식을 개체-내 요인으로 하는 반복측정 분산분석을 하였다. 유의한 주효과가 나타나면 Bonferroni 보정된 사후 다중 비교를 수행하였다. 반복측정 요인에 대한 구형성(sphericity)은 Mauchly의 검정을 통해 평가하였으며, 구형성이 위반된 경우에는 Greenhouse-Geisser 또는 Huynh-Feldt 보정을 적용하였다(Field, 2009).

모든 통계 분석의 유의수준은 p=.05로 설정하였다. 효과 크기는 부분 η^2를 사용하여 산출하였으며, Cohen의 기준에 따라 해석하였다. 모든 통계 처리는 SPSS Statistics 29.0.2.0 (IBM Corp., USA)을 사용하여 수행되었다.

3. Results

3.1 Relationship between RULA score and perceived workload

RULA 점수와 주관적 작업부하 간의 관계를 확인하기 위한 상관분석은 단일 수행, 반복 수행, 유지 수행 과제에서 각각 독립적으로 실시되었다. 그 결과, 모든 과제에서 RULA 점수가 증가할수록 주관적 작업부하가 유의하게 증가하는 양의 상관관계가 나타났다(단일 수행: r=.439, p<.001; 반복 수행: r=.493, p<.001; 유지 수행: r=.496, p<.001).

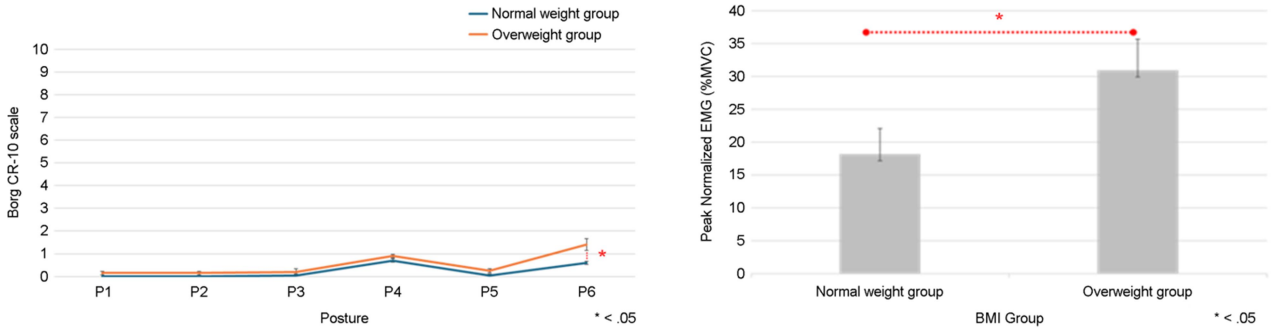
추가적으로, RULA Action Category (AC 2~AC 4)를 독립변수로 설정하고, 각 Action Category에 대응하는 작업 자세(P1~P6) 간 주관적 작업부하의 차이를 비교하기 위해 일원배치 분산분석을 수행하였다. 분석 결과, 세 과제 모두에서 Action Category 집단 간 주관적 작업부하에 유의한 차이가 나타났다(단일 수행: F=14.162, p<.001; 반복 수행: F=33.108, p<.001; 유지 수행: F=45.176, p<.001). Bonferroni 사후검정 결과에서는 AC 3 및 AC 4에 해당하는 작업 자세가 AC 2에 비해 유의하게 높은 주관적 작업부하를 보였다.

3.2 Effects of posture, gender, and BMI during single-task condition

단일 수행 과제에서 작업 자세(Posture)는 모든 신체 부위의 주관적 작업부하 및 근전도 반응에 대해 유의한 주효과를 보였다(p<.001). 특히 어깨, 위팔, 아래팔, 등 하부, 손목 부위에서 큰 효과크기(η^2=.49~.81)가 관찰되었다.

상호작용 분석 결과, Posture×Gender 효과는 어깨, 아래팔, 등 하부에서 유의하게 나타났으며, Posture×BMI Group 효과는 아래팔과 등 하부에서 유의하였다. 일부 신체 부위에서는 Gender×BMI Group×Posture의 3요인 상호작용도 확인되었다.

개체-간 효과 분석에서는 성별은 어깨에서만 유의한 차이를 보인 반면(p<.001), BMI 그룹은 어깨, 등 상부, 위팔, 등 하부에서 유의한 차이를 나타냈다(p<.05) (Figure 2).



(a) Subjective lower back workload (b) Erector spinae muscle load (%MVC) at P3

Figure 2. BMI group differences in lower back responses during the single task

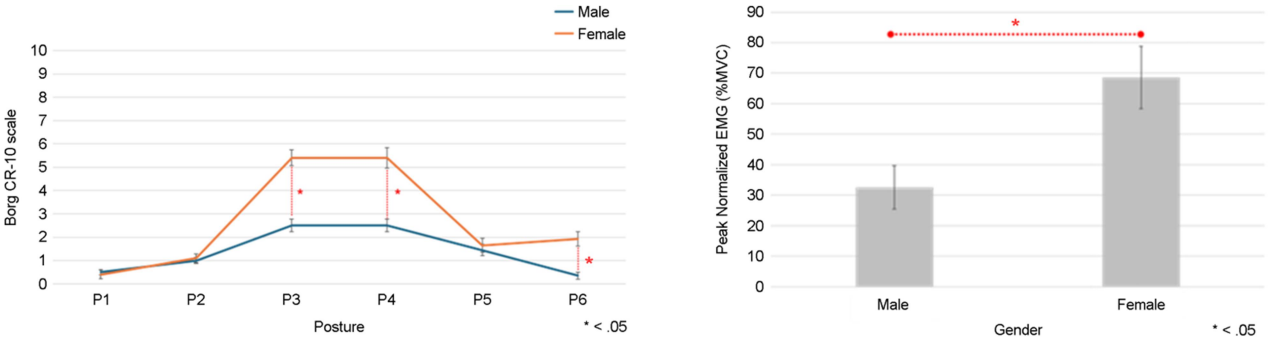
3.3 Effects of posture, gender, and BMI during repeated-task condition

반복 수행 과제에서 작업 자세(Posture)는 모든 신체 부위에서 매우 유의한 영향을 미쳤으며(p<.001), 어깨, 위팔, 아래팔, 등 하부, 손목 부위에서 매우 큰 효과크기(η^2=.86~.95)가 관찰되었다.

Posture×Gender 상호작용은 대부분의 신체 부위에서 유의하게 나타났으며, 단일 수행 조건에 비해 성별에 따른 반응 차이가 더욱

뚜렷하였다. 반면, Posture×BMI Group 효과는 제한된 부위에서만 유의하게 나타났으며, 주로 목과 어깨 부위에 국한되었다.

개체-간 효과 분석에서는 Gender×BMI Group 상호작용이 어깨, 등 상부, 등 중앙, 아래팔, 등 하부, 손목 등 다수의 부위에서 유의하게 나타났으며, 특히 등 하부에서 가장 큰 효과크기(η^2=.838)가 관찰되었다. 전반적으로 반복 수행 조건에서는 BMI 그룹보다 성별 요인과 관련된 효과가 더 많은 신체 부위에서 일관되게 확인되었다(Figure 3).



(a) Subjective upper arm workload (b) Biceps brachii muscle load (%MVC) at P3

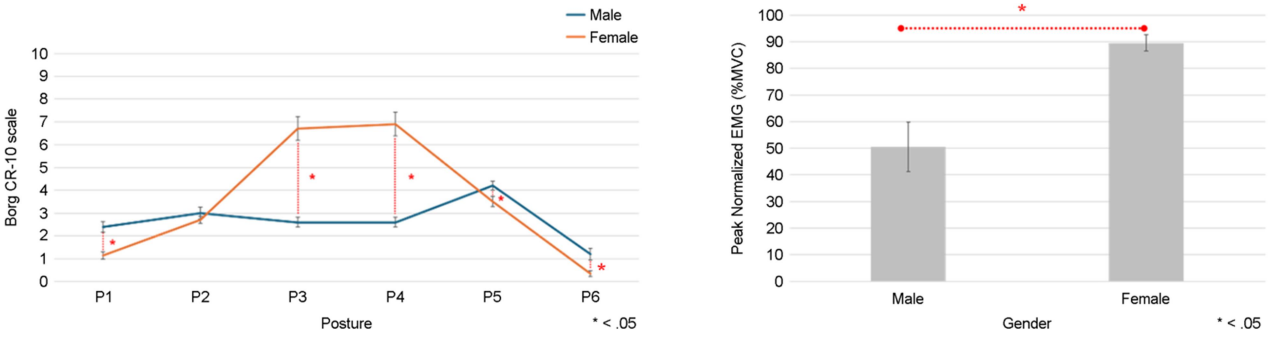
Figure 3. Gender differences in upper arm responses during the repeated task

3.4 Effects of posture, gender, and BMI during sustained-task condition

유지 수행 과제에서 작업 자세(Posture)는 모든 신체 부위에서 유의한 영향을 미쳤으며(p<.001), 어깨, 위팔, 아래팔, 등 하부, 손목 부위에서 η^2=.848~.920 범위의 매우 큰 효과크기가 나타났다.

Posture×Gender 상호작용은 주요 신체 부위 전반에서 유의하였으며(p<.001), Posture×BMI Group 효과는 어깨, 등 상부, 등 하부 등 일부 부위에서만 유의하게 나타나 성별 요인에 비해 제한적인 범위를 보였다.

개체-간 효과 분석에서는 성별이 어깨, 위팔, 아래팔에서 유의한 차이를 보였으며(Figure 4), BMI 그룹은 위팔과 아래팔에서 유의한 차이를 보였다.



(a) Subjective shoulder workload (b) Anterior deltoid muscle load (%MVC) at P4

Figure 4. Gender differences in shoulder responses during the sustained task

3.5 Effects of task type across postures with identical RULA scores

동일한 작업 자세에서 수행 방식(단일 수행, 반복 수행, 유지 수행)에 따른 차이를 확인하기 위해 반복측정 분산분석을 수행하였다. 그 결과, 모든 작업 자세에서 수행 방식의 주효과가 통계적으로 유의하게 나타났으며(p<.001), 효과크기는 η^2=.790~.958 범위로 매우 크게 나타났다.

Bonferroni 사후검정 결과, 모든 자세에서 단일 수행 과제가 반복 수행 및 유지 수행 과제에 비해 유의하게 낮은 주관적 작업부하를 보였다(p<.001). 또한, 대부분의 자세에서 유지 수행 조건은 반복 수행 조건보다 유의하게 높은 작업부하를 유발하였다(p=.008~<.001).

이러한 결과를 바탕으로, 주관적 작업부하가 가장 크게 나타난 유지 수행 과제(Task 3) 조건에서 작업 자세 간 차이를 추가로 분석하였다. 그 결과, Greenhouse-Geisser 보정을 적용한 개체-내 효과 검정에서 작업 자세에 따른 주관적 작업부하는 통계적으로 유의한 차이를 보였다(F(1.327, 25.219)=34.992, p<.001). Bonferroni 사후검정 결과에서는 중량물 취급 자세에 해당하는 AC 3가 AC 4에 비해 유의하게 높은 주관적 작업부하를 나타냈다(p<.05) (Figure 5).

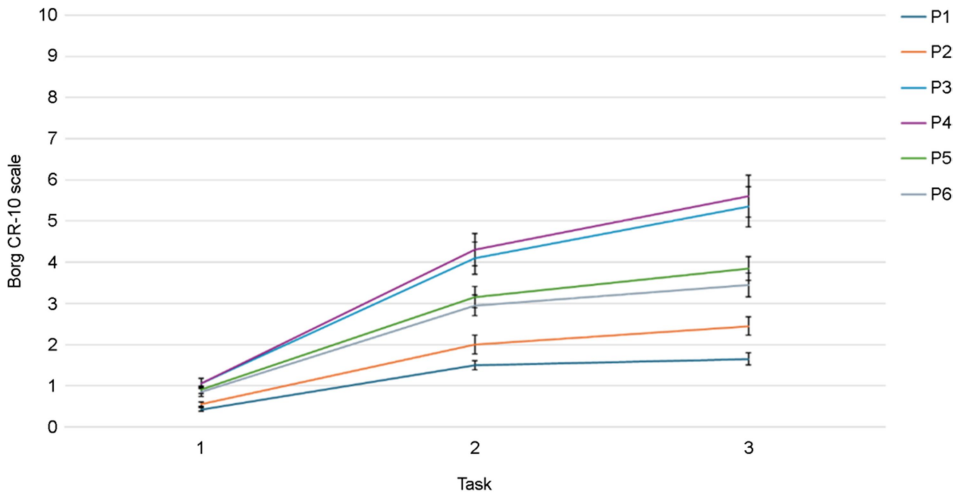


Figure 5. Changes in Borg CR-10 Scale scores during task performance across work postures

4. Discussion

본 연구는 RULA 점수가 작업자의 주관적 작업부하와 근전도 반응을 어느 정도 반영하는지를 검증하고, 성별과 BMI 그리고 과제 수행 방식이 근골격계 부담에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과, RULA 점수는 모든 수행 과제에서 주관적 작업부하와 유의한 양의 관계를 보였으나, 그 상관 수준은 중등도에 머물렀다. 이는 RULA가 작업 자세의 위험 수준을 개략적으로 구분하는 데에는 유용하지만, 실제 근부하의 크기나 분포를 정밀하게 설명하는 데에는 한계가 있음을 시사한다. 또한, 이러한 한계는 관찰 기반 평가 기법 특성상 누적 피로와 회복 과정, 그리고 개인적 요인의 영향을 충분히 반영하지 못한다는 선행연구들의 결과와 일치한다(Chiasson et al., 2012; Takala et al., 2010; Winkel and Mathiassen, 1994).

한편, 동일한 작업 자세에서도 성별과 BMI에 따라 주관적 작업부하와 근전도 반응이 유의하게 달라졌으며, 그 차이는 반복 수행 및 정적 유지 수행과 같이 근피로와 누적 부하가 증가하는 조건에서 더욱 뚜렷했다. BMI가 증가할수록 관절 가동범위(range of motion)가 감소하는 제약으로 인해 과체중 집단이 정상체중 집단보다 굴신이나 회전과 같은 기본적인 관절 움직임에서 불리한 조건에 놓이게 되고, 이에 따른 제한된 관절 가동성과 보상적 근활성도 증가가 작업부하를 증가시킨 것으로 나타난다(Jeong et al., 2018).

특히 중량물을 취급하는 자세(AC 3)에 대한 반복 수행 및 정적 유지 수행 조건에서 BMI보다 성별에 대한 효과가 더 크게 관찰되었다. 이는 작업 시간이 길어질수록 남성과 여성 간 평균적인 근력 수준, 근섬유 크기 및 최대 근력 발현 능력의 차이가 동일한 작업 조건에서 여성에게 더 높은 생리적 부담으로 작용했음을 의미한다(Kim, 2012; Nuzzo, 2023; Meyland et al., 2014). 선행연구에 따르면 여성은 제1형 근섬유보다 제2형 근섬유의 단면적이 더 작은 특성을 보이는 경향이 있으며(Simoneau and Bouchard, 1989; James et al., 2025), 이러한 근섬유 특성은 큰 힘을 요구하는 중량물 취급 작업에서 상대적으로 더 높은 근활성도로 이어지기에 성별에 따른 작업부하 반응의 차이가 더욱 두드러졌을 것으로 해석된다.

수행 방식에 따른 비교 결과에서는 단일 수행, 반복 수행, 유지 수행 순으로 주관적 작업부하와 근전도 반응이 일관되게 증가하는 것이 확인되었다. 반복적이거나 장시간 지속되는 근수축이 근피로를 누적시키고, 근활성도 증가 및 근기능 저하를 유발한다는 생리학적 메커니즘을 반영한 결과로 보인다(Jones et al., 2006). 특히 정적 수축이나 반복 동작이 지속될 경우 근육의 회복 시간이 충분히 확보되지 않아 피로가 누적되며, 동일한 작업 자세라 하더라도 작업의 반복성과 시간적 지속성이 근골격계 부담을 크게 증폭시킬 수 있다(Enoka and Duchateau, 2008).

또한, 중량물 취급 자세에 해당하는 AC 3가 AC 4보다 더 큰 작업부하를 유발한 결과는 RULA Action Category가 항상 생리적 부담의 크기와 비례하지 않을 수 있음을 보여준다. 이는 현재 RULA 체계에서 중량물 취급 요소가 제한적으로 반영되고 있으며, 하중의 크기와 근육 사용 양상을 충분히 고려하지 못하고 있음을 시사한다. 따라서 중량물 취급이 포함된 작업은 외적 하중과 그에 따른 근부하가 작업 부담을 결정하는 핵심 요인으로 작용할 수 있으며, 작업 유형에 따라 작업부하가 재조정될 가능성이 있다. 이러한 관점에서 향후 RULA 체계에는 성별의 차이와 중량물 취급 특성을 반영할 수 있는 가중치 또는 보정 요소를 추가로 고려할 필요성이 제기된다.

5. Conclusion

본 연구는 RULA 점수가 실제 작업자의 주관적 작업부하 및 근전도 반응을 어느 정도 설명할 수 있는지를 실험적으로 검증하기 위하여 성별, BMI, 그리고 과제 수행 방식이 근골격계 부담에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 동일한 작업 자세에서도 개인의 생리적 특성과 수행 방식에 따라 작업부하가 상이하게 나타날 수 있음을 확인하였으며, 기존 RULA 체계가 실제 작업부하를 충분히 반영하지 못할 가능성을 제시하였다.

특히 반복 수행 및 정적 유지와 같이 작업 시간이 누적되는 조건에서 체질량지수보다 성별에 따른 근부하 반응 차이가 더욱 확대되는 경향이 관찰되었다. 이는 RULA 평가 과정에서 성별, 작업 시간과 같은 요소를 가중적으로 고려할 필요성을 시사한다. 더 나아가, 본 연구의 결과는 산업현장에서 근골격계 유해요인조사 수행 시 관찰 기반 평가 기법을 보다 정교하게 개선하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Acknowledgement

This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2024.

References

Barbonis, P.A., *Measurement and modelling of postural work load*. Doctoral dissertation, University of Birmingham, 1978.

Chaffin, D.B., Andersson, G.B. and Martin, B.J., *Occupational biomechanics*, John wiley & sons, 2006.

Chiasson, M.È., Imbeau, D., Aubry, K. and Delisle, A., Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(5), 478-488, 2012. doi:10.1016/j.ergon.2012.07.003

Ding, X., Guan, Z., Liu, N., Bi, M., Ji, F., Wang, H., Zhang, X., Liu, B., Niu, D., Lan, T., Xie, T., Li, J. and Yan, T., Prevalence and risk factors of work-related musculoskeletal disorders among emerging manufacturing workers in Beijing, China, 2023. doi:10.3389/fmed.2023.1289046

Enoka, R.M. and Duchateau, J., Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of Physiology*, 586(1), 11-23, 2008. doi:10.1113/jphysiol.2007.139477

Field, A., Discovering statistics using SPSS-SAGE Publications Ltd. *London, UK*, 264-315, 2009.

Hagberg, M., WORK Related Musculoskeletal Diosorders (WMSDs). *A reference book for prevention*, 115-137, 1995.

James, J.J., Mellow, M.L., Bueckers, E.P., Gutsch, S.B., Wrucke, D.J., Pearson, A.G., Smith, A.E. and Hunter, S.K., Sex differences in human skeletal muscle fiber types and the influence of age, physical activity, and muscle group: A systematic review and meta-analysis. *Physiological Reports*, 13(21), e70616, 2025. doi:10.14814/phy2.70616

Jeong, Y., Heo, S., Lee, G. and Park, W., Pre-obesity and obesity impacts on passive joint range of motion. *Ergonomics*, 61(9), 1223-1231, 2018. doi:10.1080/00140139.2018.1478455

Jones, D.A., De Ruiter, C.J. and De Haan, A., Change in contractile properties of human muscle in relationship to the loss of power and slowing of relaxation seen with fatigue. *The Journal of Physiology*, 576(3), 913-922, 2006. doi:10.1113/jphysiol.2006.116343

Karwowski, W. and Marras, W.S. (Eds.), Occupational ergonomics: principles of work design. *CRC press*, 2003.

Kee, D.H. and Park, K.H., Comparison of Posture Classification Schemes of OWAS, RULA and REBA. *Journal of the Korean Society of Safety*, 20(2), 127-132, 2025.

Kim, H., Age-and gender-related differences of muscle mass in Korean. *The Korean Journal of Obesity*, 21(4), 220-227, 2012.

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. doi:10.1016/0003-6870(93)90080-S

Meyland, J., Heilskov-Hansen, T., Alkjær, T., Koblauch, H., Mikkelsen, S., Svendsen, S.W., Thomsen, J.F., Hansson, G.Å. and Simonsen, E.B., Sex differences in muscular load among house painters performing identical work tasks. *European Journal of Applied Physiology*, 114(9), 1901-1911, 2014. doi:10.1007/s00421-014-2918-6

Miller, R.G., Giannini, D., Milner-Brown, H.S., Layzer, R.B., Koretsky, A.P., Hooper, D. and Weiner, M.W., Effects of fatiguing exercise on high-energy phosphates, force, and EMG: evidence for three phases of recovery. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, 10(9), 810-821, 1987. doi:10.1002/mus.880100906

Milner, N., Modelling fatigue and recovery in static postural exercise. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 1(1), 29, 1986. doi:10.1016/0268-0033(86)90034-3

Nuzzo, J.L., Narrative Review of Sex Differences in Muscle Strength, Endurance, Activation, Size, Fiber Type, and Strength Training Participation Rates, Preferences, Motivations, Injuries, and Neuromuscular Adaptations. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 37(2), 494-536, 2023. doi:10.1519/JSC.0000000000004329

Simoneau, J.A. and Bouchard, C., Human variation in skeletal muscle fiber-type proportion and enzyme activities. *The American Journal of Physiology*, 257(4 Pt 1), E567-E572, 1989. doi:10.1152/ajpendo.1989.257.4.E567

Takala, E.P., Pehkonen, I., Forsman, M., Hansson, G.Å., Mathiassen, S.E., Neumann, W.P., Sjøgaard, G., Veiersted, K.B., Westgaard, R.H. and Winkel, J., Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 3-24, 2010.

Viester, L., Verhagen, E.A., Hengel, K.M.O. Koppes, L.L., van der Beek, A.J. and Bongers, P.M., The relation between body mass index and musculoskeletal symptoms in the working population, *BMC Musculoskeletal Disorders*, 14(1), 238, 2013. doi:10.1186/1471-2474-14-238

Winkel, J. and Mathiassen, S.E., Assessment of physical work load in epidemiologic studies: concepts, issues and operational considerations. *Ergonomics*, 37(6), 979-988, 1994. doi:10.1080/00140139408963711

Author listings

Ji Ung Kim: rlawldnd1025@naver.com
Highest degree: Bachelor's Degree, Department of Safety Engineering, Chungbuk National University
Position title: Undergraduate Student, Department of Safety Engineering, Chungbuk National University
Areas of interest: Work-related Musculoskeletal Disorders, Postural Risk Assessment

Minseok Son: m.son@cbnu.ac.kr
Highest degree: Ph.D., Department of Industrial Engineering, Seoul National University
Position title: Assistant Professor, Department of Safety Engineering, Chungbuk National University
Areas of interest: Industrial Safety, Biomechanics