JESK J Ergon Soc Korea 2025; 44(6): 939-948
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2025.44.6.939
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Effect of Shoulder Flexion Angle and Repetition Frequency on Upper-limb Muscle Activity and Maximum Endurance Time

Kyeong-Hee Choi, Jeong-Bae Ko, Jae-Soo Hong

Korea Institute of Industrial Technology, Regional Industrial Innovation Department (ESH), Cheonan, 31056

어깨 굴곡 각도 및 작업 빈도가 근활성도 및 최대유지시간에 미치는 영향

최경희, 고정배, 홍재수

한국생산기술연구원, 지역산업혁신부문

Corresponding Author
Kyeong-Hee Choi
Korea Institute of Industrial Technology, Regional Industrial Innovation Department (ESH), Cheonan, 31056
Email : ckhee@kitech.re.kr

Received : November 18, 2025
Revised : December 03, 2025
Accepted : December 05, 2025

Copyright@2025 by The Human Factors & Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: The purpose of this study was to evaluate the effect of shoulder flexion angle and task type on upper-limb muscle activity and maximum endurance time during a simulated drilling task.

Background: Repetitive upper-limb tasks are commonly observed in manufacturing, construction and logistics industries. Awkward shoulder postures and high repetition of tasks are well known contributors to high prevalence rate of work-related musculoskeletal disorders (WMSDs). Although both shoulder posture and task repetition rate are recognized as main ergonomic risk factors, few studies have systematically examined their combined effect on muscle activity and maximum endurance time.

Method: Seven healthy males participated in this experiment. Participants performed 12 tasks combining four shoulder flexion angles (45°, 90°, 135° and 180°) and three task types (static holding, 6 reps/min and 12 reps/min). Surface electromyography (sEMG) was recorded from four upper-limb muscles (upper trapezius, anterior deltoid, middle deltoid, biceps brachii). Maximum endurance time (MET) was defined as the duration which participants could maintain the task until they voluntarily stopped due to fatigue or discomfort. A two-way ANOVA was used to examine the effects of shoulder angle and task type.

Results: Both shoulder flexion angle and task type had significant effects on muscle activity and MET (all $p < 0.05$). Muscle activity was highest during high-frequency task and at 180° of shoulder flexion. Under static and low-frequency tasks, the increase in muscle activity associated with greater shoulder flexion angle was relatively modest; however, during high-frequency tasks, the increase in muscle activity with increasing shoulder flexion angle became more pronounced.

Conclusion: This study demonstrates that high-frequency repetitive tasks induced faster fatigue compared to static holding, and the combination of high shoulder angles and high repetition rates constituted a high-risk exposure pattern. These findings highlight the importance of minimizing overhead work and controlling task repetition rates to prevent WMSDs.

Application: This study provides quantitative evidence on the combined effects of task type and shoulder posture, and is expected to serve as a scientific basis for prevention of work-related musculoskeletal disorders in the field of occupational safety and health.

Keywords: Shoulder flexion angle, Repetitive task, Maximum endurance time, Muscle activity

1. Introduction

반복적인 상지 움직임은 제조업, 건설업, 물류업 등 다양한 산업현장에서 매우 빈번하게 수행되는 작업이다. 특히 전동드릴이나 드라이버와 같은 공구를 사용하는 과업은 어깨와 팔의 지속적이고 반복적인 사용을 야기하며, 이는 작업관련성 근골격계질환(work-related musculoskeletal disorders, WMSDs)의 주요 원인으로 알려져 있다. 선행연구에 따르면 어깨를 들어올린 자세는 어깨 관절에 가해지는 생체역학적 부하를 증가시키고, 주요 근육의 피로도를 크게 높여 불편감을 유발한다(Nimbarte et al., 2012; Shin et al., 2012; Fewster and Dickerson, 2021). 특히 어깨 높이 이상에서 작업하는 근로자의 70%는 심각한 어깨 통증을 호소한다고 보고된 바 있으며(Bjelle et al., 1981), 중립자세로부터 팔을 올릴수록 근육부하는 증가한다고 알려져 있다(Wiker et al., 1989; Palmerud et al., 2000; Kim et al., 2003; Ferguson et al., 2013).

작업자세 뿐만 아니라 작업 빈도, 유지 시간과 같은 작업 특성 역시 근골격계질환과 높은 관련이 있다. 휴식시간이 짧고 반복횟수가 높은 작업은 근육의 피로를 가중시킨다고 보고된 바 있으며(Hooper et al., 2014; Kapan et al., 2025), 정적인 자세를 오랫동안 유지하는 작업 역시 WMSDs 유병률을 증가시키는 원인 중 하나이다(Anghel et al., 2007). 작업자세와 작업 특성은 매우 중요한 요인임에도 두 요인을 동시에 고려하여 작업부하에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. Ferguson et al. (2013)은 세 가지 작업 특성(어깨 굴곡 각도, 분당 반복횟수, 하중)에 대하여 근전도를 이용하여 세 요인간의 관계를 규명하고자 하였으나, 근전도 데이터를 통한 유의미한 교호작용을 규명하지는 못하였다. Law et al. (2010)은 정적 과업과 동적 과업에 대하여 주관적 부하와 Maximum holding time 간 상관관계를 규명하고자 하였다. 그 결과 정적 과업과 동적 과업간 통증 증가 경향이 상이함을 규명하였으나, 불편도만으로 작업의 위험을 평가했다는 한계점이 있다.

기존 연구의 한계점을 보완하고자 본 연구는 전동드릴을 이용한 모의 작업을 통해 어깨 전방 굴곡 각도(45, 90, 135, 180°)와 작업 유형(정적 유지, 저빈도 반복: 6회/분, 고빈도 반복: 12회/분)이 상지 주요 근활성도와 최대유지시간(Maximum endurance time)에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 하였다. 반복작업 환경에서 어깨 각도와 작업 빈도에 따라 근활성도가 어떻게 변화하는지를 규명하는 것은 근골격계질환을 예방하고 새로운 평가 체계를 개발하는데 필수적으로 수행되어야 하는 연구이다.

2. Method

2.1 Participants

본 연구를 위하여 6개월 이내 근골격계질환 관련 병력이 없는 건강한 남성 7명을 섭외하였다. 본 연구는 한국생산기술연구원 기관 IRB (#A-2023-016) 승인을 받아 진행되었으며, 실험에 앞서 연구 목적, 방법 등의 사전 설명 후 피험자의 서면 동의를 받아 진행되었다.

2.2 Experimental design

본 연구에서는 네 수준의 어깨 각도(45, 90, 135, 180°)와 세 수준의 과업 유형(정적 유지, 저빈도 반복: 6회/분, 고빈도 반복: 12회/분)이 독립변수로 선정되었다. 총 12개 조합(네 수준 어깨 각도 * 세 수준 과업 유형)에 대하여 전동드릴(GSR18V-EC, Bosch, Stuttgart, Germany)을 들고 해당 자세를 유지 또는 반복하는 과업을 수행하였다(Figure 1). 피험자의 어깨 견봉(Acromion)을 기준점으로 네 수준

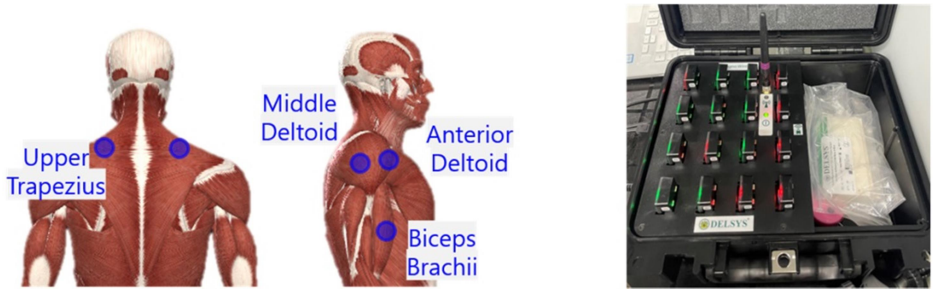
의 어깨 굴곡 각도(45, 90, 135, 180°)를 시각적으로 확인할 수 있는 가이드라인을 우측에 부착하여, 피험자가 목표 각도를 정확히 유지하고 반복할 수 있도록 하였다. 또한 실제로 나사를 삽입하지는 않았으나, 무게 1.7kg의 전동드릴을 들고 해당 자세를 유지하거나 반복하여 드릴링 작업을 모사하였다. 메트로놈을 이용하여 일정한 간격으로 반복할 수 있도록 하였으며, 피험자가 통증 또는 피로로 인해 실험이 불가하다고 선언하는 시점에 도달하면 실험을 종료하였다. 피험자가 해당 어깨 각도를 잘 유지하는지 모니터링 하기 위하여 동작분석 장비인 myoMotion (Noraxon, Scottsdale, AZ, USA)을 활용하였으며, 해당 각도에서 10% 이상 벗어나는 경우 연구자가 피험자의 자세를 교정해주었다. 종속변수로는 주력 방향 4개 상지 근육에 대한 표면 근활성도(Surface Electromyography, sEMG)와 해당 과업을 최대로 수행할 수 있는 최대유지시간(Maximum Endurance time, sec.)이 선정되었다.

(a) (b) (c) (d)

Figure 1. Experimental postures of the drilling tasks at four levels of shoulder flexion angle. (a) Shoulder flexion 45°, (b) Shoulder flexion 90°, (c) Shoulder flexion 135°, (d) Shoulder flexion 180°

2.3 Outcome measures

본 실험을 위해서 주력 방향의 주요 상지 근육(상부승모근, 중간삼각근, 전면삼각근, 상완이두근)의 표면 근전도가 측정되었다(Kadefors et al., 1976; Gerdle et al., 1988; Anton et al., 2001; Nussbaum, 2001). 표면 근전도 측정을 위해서 무선 근활성도 측정 장비인 Trigno wireless EMG system (Delsys, Natick, MA, USA)이 사용되었으며(Figure 2b), 센서의 부착위치는 SENIAM Guideline을 토대로 선정되었다(Figure 2a). 표면 근전도 신호의 Sampling rate는 2,158Hz이며, Butterworth second-order bandpass filter (Low frequency: 20Hz, High frequency: 450Hz)를 이용하여 필터링하였다. 전선으로 인한 노이즈를 제거하기 위하여 60Hz 노치필터가 활용되었다. 분석을 위하여



(a) (b)

Figure 2. Electrode placement locations for 4 muscles (a) and sEMG acquisition device (b)

근육별 Maximum voluntary contraction (MVC)을 토대로 정규화된 값인 % MVC가 사용되었다. 상부승모근 MVC의 경우, 검사자가 피험자의 어깨 상부에서 아래 방향으로 누르면 피험자는 이에 저항하여 강하게 어깨를 들어올려 수축하도록 하였다(Smith et al., 2004). 중간삼각근의 경우, 어깨를 90°로 외전한 자세에서 검사자가 어깨 내전 방향으로 힘을 가하면 이에 저항하여 어깨 외전을 수행하도록 하였다(Smith et al., 2004). 전면삼각근의 경우, 어깨를 90°로 굴곡한 상태에서, 아래 방향으로 가해지는 힘에 저항하여 팔을 위로 들어올리도록 하였다(Konrad, 2005). 상완이두근의 경우, 팔꿈치를 90°로 굽힌 상태에서 팔꿈치 신전 방향으로 가해지는 힘에 저항하여 팔꿈치를 최대로 굽히도록 하였다(Kidgell et al., 2010). 피험자가 특정 과업을 유지 또는 반복하다가 피로 또는 통증 등으로 인하여 더 이상 수행할 수 없다고 선언할 때까지 소요되는 시간을 최대유지시간이라고 정의하였으며, 스마트폰의 초시계를 이용하여 측정하였다.

2.4 Experimental procedure

실험에 앞서 피험자에게 실험 정보 및 절차에 대한 고지를 전달하였으며, 서면으로 실험 동의서를 작성하였다. 근활성도 측정을 위해 주력 방향 4개의 상지 근육에 표면 근전도 센서를 부착하였으며, 데이터 정규화를 위하여 각 근육별 MVC를 3회씩 반복측정 하였다. 피로 방지를 위하여 반복간 3분의 휴식시간을 제공하였으며, 최대값을 활용하여 % MVC로 정규화 하였다. 열 두개 작업에 대하여 순서로 인한 효과를 방지하기 위하여 임의의 순서로 실험이 진행되었으며, 하루에 두 종류의 작업만 수행되었다(총 6일 소요). 피로 방지를 위하여 작업간 30분 이상의 휴식시간을 제공하였으며, 30분이 지난 이후에도 통증이나 주관적인 피로가 회복되지 않는 경우, 익일 실험을 진행하도록 하였다.

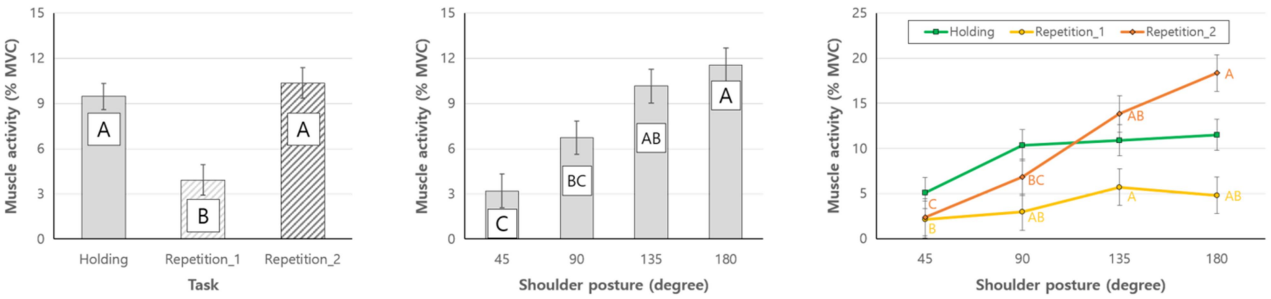
2.5 Statistical analysis

모든 통계 분석은 SPSS 소프트웨어(version 18; SPSS Icn., Chicago, IL, USA)를 사용하였다. Task와 어깨 굴곡 각도에 따른 근활성도 및 지구력(Endurance time)의 차이를 분석하기 위하여 이원배치 분산분석(Two-way ANOVA)을 실시하였다. 분산분석 결과 유의한 경우에 대하여 Tukey's HSD (Honestly Significance Difference) 사후검정을 통해 조건간 유의한 차이를 확인하였다. 모든 통계적 유의수준은 $p<0.05$로 설정하였다.

3. Results

3.1 Muscle activity

모든 근육에 대하여 과업 유형 및 어깨 각도에 따른 근활성도의 주효과 및 교호작용은 모두 유의한 것으로 나타났다(all $p<0.05$). 상부승모근의 경우, 유지 과업과 고빈도 반복작업(분당 12회) 대비 저빈도 반복작업(분당 6회) 시 근활성도가 가장 낮았다(Figure 3a). 어깨

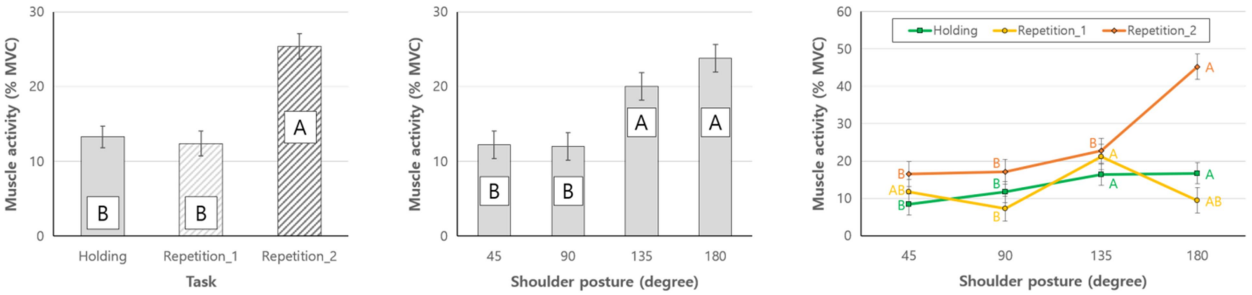


(a) (b) (c)

Figure 3. Muscle activity of upper trapezius according to the task type and shoulder posture. (a) Main effect of task type; (b) Main effect of shoulder posture; (c) Interaction effect between task type and shoulder posture. Different letters indicate significant differences based on Tukey's HSD post-hoc test, $p<0.05$

각도의 경우, 굴곡 각도가 증가할수록 근활성도가 유의하게 증가하여 180°에서 가장 큰 근활성도가 관찰되었다(Figure 3b). 과업 유형과 어깨 각도에 대한 교호작용의 경우, 유지 과업은 어깨 각도에 따른 근활성도의 차이가 유의하지 않았으나, 반복작업 수행 시에는 어깨 각도에 따른 근활성도의 차이가 유의한 것으로 나타났다. 특히 고빈도 반복작업에서는 어깨 각도 증가에 따라 근활성도가 상대적으로 큰 폭으로 증가하는 양상이 관측되었다(Figure 3c).

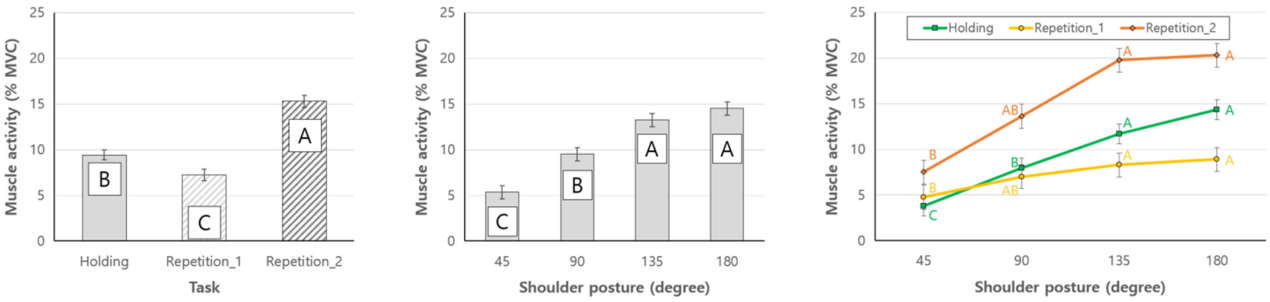
전면삼각근의 경우, 분당 12회 반복작업에서 가장 큰 근활성도가 관측되었다(Figure 4a). 어깨 각도의 경우, 135, 180°에서 다른 각도 대비 유의하게 높은 근활성도를 관찰할 수 있었다(Figure 4b). 교호작용의 경우, 유지 과업과 저빈도 반복작업 시에는 어깨 각도 변화에 따른 근활성도의 변화가 상대적으로 작았으나, 고빈도 반복작업 수행 시 어깨 각도 180°도에서 근활성도 큰 폭으로 증가하는 경향이 관측되었다(Figure 4c).



(a) (b) (c)

Figure 4. Muscle activity of anterior deltoid according to the task type and shoulder posture. (a) Main effect of task type; (b) Main effect of shoulder posture; (c) Interaction effect between task type and shoulder posture. Different letters indicate significant differences based on Tukey's HSD post-hoc test, $p<0.05$

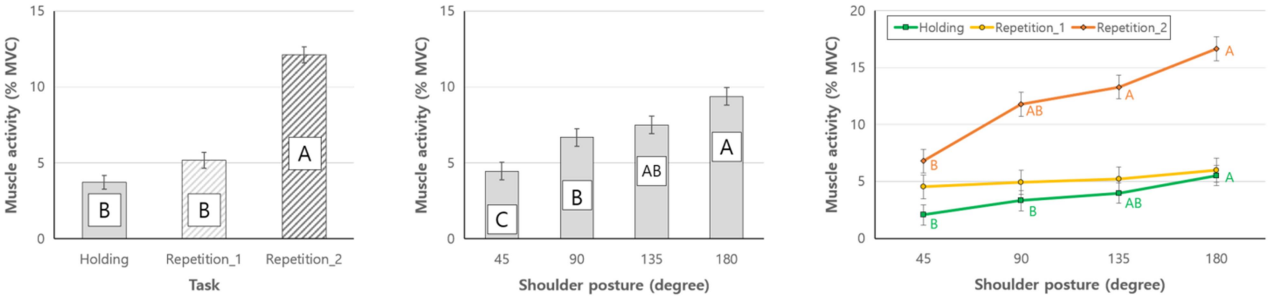
중간삼각근의 경우, 고빈도 반복작업에서 가장 큰 근활성도, 저빈도 반복작업에서 가장 작은 근활성도가 관측되었다(Figure 5a). 어깨 각도의 경우, 135, 180°에서 유의하게 높은 근활성도가 관측되었다(Figure 5b). 교호작용의 경우, 모든 과업에 대하여 어깨 각도가 증가할수록 근활성도도 유의하게 증가하였으나, 그 증가폭은 고빈도 반복작업에 상대적으로 큰 것으로 나타났다(Figure 5c).



(a) (b) (c)

Figure 5. Muscle activity of middle deltoid according to the task type and shoulder posture. (a) Main effect of task type; (b) Main effect of shoulder posture; (c) Interaction effect between task type and shoulder posture. Different letters indicate significant differences based on Tukey's HSD post-hoc test, $p<0.05$

상완이두근의 경우, 고빈도 반복작업과 180° 자세에서 가장 큰 근활성도가 관측되었다(Figure 6a, b). 교호작용의 경우, 저빈도 반복작업에서는 어깨 각도에 따른 근활성도의 차이가 유의하지 않았으나, 유지 및 고빈도 반복작업에서는 어깨 각도 증가에 따라 근활성도가 유의하게 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 증가 경향은 특히 고빈도 반복작업에서 큰 것으로 나타났다(Figure 6c).

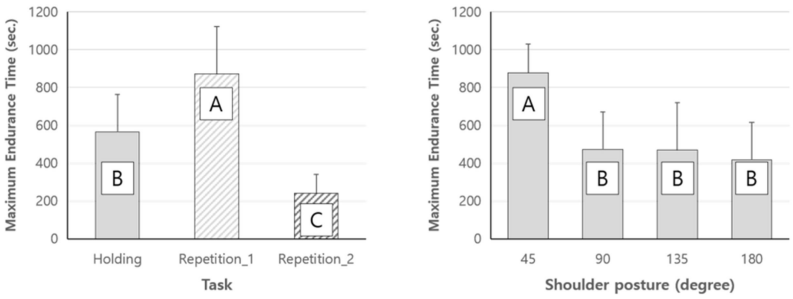


(a) (b) (c)

Figure 6. Muscle activity of biceps brachii according to the task type and shoulder posture. (a) Main effect of task type; (b) Main effect of shoulder posture; (c) Interaction effect between task type and shoulder posture. Different letters indicate significant differences based on Tukey's HSD post-hoc test, $p<0.05$

3.2 Maximum endurance time

최대유지시간에 대한 과업 유형 및 어깨각의 주효과는 모두 통계적으로 유의하였으나(all $p<0.05$), 교호작용은 유의하지 않았다. 저빈도 반복작업 수행 시의 최대유지시간이 가장 길었으며, 그 다음으로 유지 과업, 고빈도 반복작업 순의 경향이 관측되었다(Figure 7a). 어깨 각도의 경우, 45° 자세에서 유의하게 큰 최대유지시간)이 관측되었으며, 90, 135, 180°에서는 유사한 최대유지시간이 나타났다(Figure 7b).



(a) (b)

Figure 7. Maximum endurance time according to the task type and shoulder posture. (a) Main effect of task type; (b) Main effect of shoulder posture. Different letters indicate significant differences based on Tukey's HSD post-hoc test, $p<0.05$

4. Discussion

본 연구는 실험을 통해 어깨 전방 굴곡 각도와 작업 특성이 상지 근육의 근활성도와 최대유지시간에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 실험 결과, 모든 근육에 대하여 어깨 자세와 작업 특성 모두 유의한 주효과를 나타냈으며, 특히 고빈도 반복작업(분당 12회)

에서 어깨 각도 증가에 따른 근활성도 증가폭이 더욱 두드러지게 나타나는 현상을 확인하였다.

4.1 Effects of task type

작업 유형에 따른 분석 결과, 모든 근육에 대하여 고빈도 반복작업(분당 12회) 수행 시 가장 높은 근활성도, 저빈도 반복작업(분당 6회)에서 가장 낮은 근활성도가 관찰되었다. 최대유지시간 역시 동일한 경향을 보였는데, 고빈도 반복작업에서 가장 짧았으며, 저빈도 반복작업에서 유의하게 긴 것으로 나타났다. 이는 반복 속도가 빠르고, 휴식시간이 짧으면 피로가 더욱 커진다는 기존의 연구 결과(Mathiassen and Winkel, 1996; Rashedi and Nussbaum, 2016)를 뒷받침하는 결과이다.

특히 본 연구의 중요한 발견은, 정적 유지작업보다 짧은 휴식시간이 포함된 고빈도 반복작업에서 유의하게 큰 근활성도를 나타냈으며, 최대유지시간 또한 정적 유지작업 대비 유의하게 짧았다는 점이다. 이는 정적으로 자세를 유지하는 작업보다 고빈도 반복작업 수행 시 피로가 더욱 빠르게 진행될 수 있음을 간접적으로 시사한다. Masuda et al. (1999)은 하지 근육에 대하여 동적 수축과 정적 수축의 피로도를 근활성도를 이용하여 비교하였으나 두 조건 간에 유의미한 차이는 없다고 보고한 바 있다. Ericson (2020)는 일정 각도로 어깨 자세를 유지하는 정적 과업과 팔을 제한된 범위 안에서 반복적으로 움직이는 동적 과업을 Endurance time과 주관적 불편도의 측정을 통해 비교하였으며, 그 결과 정적 유지작업의 Endurance time이 동적 작업보다 유의하게 길게 나타났으며, 동적 작업의 불편도가 정적 작업 대비 높은 것으로 나타났다.

4.2 Effects of shoulder flexion angle

모든 근육에서 어깨 굴곡 각도가 증가할수록 근활성도가 유의하게 증가하였다. 어깨 각도가 증가함에 따라 팔의 무게 중심이 멀어져 모멘트 암이 증가하며(Ackland et al., 2008; Ettinger and Ostrander, 2018; Leonardis et al., 2020), 이에 따라 어깨 및 상완 근육에 더 큰 근활성도를 요구하게 된다. 특히 어깨각도 90° 이상의 과업에서 근활성도가 급증하는 것은 머리 위 작업이 주요 어깨 및 상지 근육의 부하를 크게 증가시키며, 상지 근골격계질환의 위험을 높인다는 기존의 연구 결과(Chopp et al., 2010; Motabar and Nimbarte, 2021)를 뒷받침한다. 이러한 결과는 산업현장에서 머리 위 작업을 줄이는 것이 어깨의 근골격계질환 예방을 위해 매우 중요하다는 점을 시사한다.

4.3 Interaction effects of task type and shoulder flexion angle

본 연구에서 확인된 상호작용 효과는 작업 반복 빈도가 높을수록 어깨 자세의 영향이 증폭된다는 점을 시사한다. 즉, 유지 혹은 저빈도 반복작업에서는 어깨 각도 증가에 따른 근활성도의 증가폭이 상대적으로 작았으나, 고빈도 반복작업에서는 어깨 각도 증가에 따라 근활성도가 급격히 증가하였다. 이는 휴식시간이 일부 존재하더라도 반복수가 높은 경우, 정적으로 유지하는 작업보다 피로가 빠르게 진행될 수 있음을 의미하며, 특히 어깨 각도 135° 이상의 머리 위 작업이 높은 반복 수와 결합되는 경우 근골격계질환 위험이 더욱 급격하게 증가할 수 있음을 간접적으로 시사한다.

그러나 해당 연구는 모의 실험 환경에서 7명의 남성만을 대상으로 수행되었기 때문에, 연구 결과를 다양한 인구집단에 일반화하는 데에는 분명한 한계점이 존재한다. 또한 실제 산업현장의 드릴링 작업을 완전히 재현한 것이 아니라 실험실 기반의 모의 과업을 사용하였기 때문에, 현장에서 발생하는 복잡한 변수(작업자세 변화, 장비의 진동 특성 등)를 충분히 반영하지 못했다는 점 역시 중요한 제약 요인이다. 따라서 향후 연구에서는 보다 다양한 성별, 연령, 경험 수준을 포함한 확장된 표본을 대상으로 실제 드릴링 작업 특성을 반영한 실험 설계가 필요할 것으로 사료된다.

5. Conclusion

본 연구에서는 어깨 전방 굴곡 각도(45, 90, 135, 180°)와 작업 유형(유지, 저빈도 반복, 고빈도 반복)에 따른 위험도를 근활성도와 최대유지시간을 토대로 정량화하였다. 그 결과, 어깨 각도와 반복 빈도 증가는 근육부하를 증가시키는 주 요인임을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 정적 유지 작업보다 짧은 휴식 간격을 가진 고빈도 반복작업이 더욱 큰 피로를 유발할 수 있음을 확인하였으며, 특히 높

은 어깨 각도와 높은 반복 빈도가 조합되는 경우, 근육 부하가 크게 증폭되는 고위험 조합임을 실험적으로 입증하였다. 본 연구 결과는 산업현장에서 머리 위 작업을 최소화하고 적정 반복 수를 유지하는 것이 근골격계질환 예방에 필수적임을 시사한다.

본 연구는 젊은 연령의 성인 남성 피험자만을 대상으로 하였기 때문에, 모든 산업현장의 근로자를 대상으로 일반화하기에는 한계점을 지닌다. 또한 실제 산업현장에서 수행되는 과업을 완전히 재현하지 못했다는 제약이 있다. 따라서 향후 연구에서는 보다 다양한 근로자 특성(연령, 성별, 근속기간 등)을 포함하며, 실제적인 작업환경 요소를 포함한 실험이 요구되는 바이다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 작업 유형과 어깨자세 결합에 따른 효과를 정량적으로 제시하였다는 점에서 산업안전 분야에 의미있는 근거자료로 활용되기를 기대하는 바이다.

Acknowledgement

이 연구는 2025년 한국생산기술연구원의 청정생산시스템핵심기술연구사업의 지원을 받아 수행하고 있는 '미래 산업환경 대응 홀로닉 생산시스템 기술 개발(No. EO250001)' 과제에서 수행된 연구임.

References

Ackland, D.C., Pak, P., Richardson, M. and Pandy, M.G., Moment arms of the muscles crossing the anatomical shoulder. *Journal of Anatomy*, 213(4), 383-390, 2008.

Anghel, M., Argesanu, V., Talpos-Niculescu, C. and Lungeanu, D., Musculoskeletal disorders (MSDS) consequences of prolonged static postures. *Journal of Experimental Medical & Surgical Research*, 4, 167-172, 2007.

Anton, D., Shibley, L., Fethke, N., Hess, J., Cook, T. and Rosecrance, J., The effect of overhead drilling position on shoulder moment and electromyography, *Ergonomics*, 44, 489-501, 2001.

Bjelle, A., Hagberg, M. and Michaelson, G., Occupational and individual factors in acute shoulder-neck disorders among industrial workers. *Occupational and Environmental Medicine*, 38(4), 356-363, 1981.

Chopp, J.N., Fischer, S.L. and Dickerson, C.R., The impact of work configuration, target angle and hand force direction on upper extremity muscle activity during submaximal overhead work. *Ergonomics*, 53(1), 83-91, 2010.

Ericson, K., Static Shoulder Elevation with or Without Limited Range of Arm Motion (Master's thesis, Montana Tech of The University of Montana), 2020.

Ettinger, L. and Ostrander, T., Gravitational torque partially accounts for proprioceptive acuity. *Human Movement Science*, 62, 41-47, 2018.

Ferguson, S.A., Allread, W.G., Le, P., Rose, J. and Marras, W.S., Shoulder muscle fatigue during repetitive tasks as measured by electromyography and near-infrared spectroscopy. *Human Factors*, 55(6), 1077-1087, 2013.

Fewster, K.M. and Dickerson, C.R., Overhead work–Reduce the injury risk. *Centre of Research Expertise for The Prevention of Musculoskeletal Disorder*, 2021.

Gerdle, B., Eriksson, E., Brundin, L. and Edström, M., Surface EMG recordings during maximum static shoulder forward flexion in different positions. *European Journal of Applied Physiology*, 57, 415-419, 1988.

Hooper, D.R., Szivak, T.K., Comstock, B.A., Dunn-Lewis, C., Apicella, J.M., Kelly, N.A., Creighton, B.C., Franagan, S.D., Looney, D.P., Volek, J.S., Maresh, C.M. and Kraemer, W.J., Effects of fatigue from resistance training on barbell back squat biomechanics. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(4), 1127-1134, 2014.

Kadefors, R., Petersen, I. and Herberts, P., Muscular reaction to welding work: an electromyographic investigation. *Ergonomics*, 19, 543-558, 1976.

Kapan, A., Ristic, M., Leser, A., Felsinger, R. and Waldhoer, T., Assessment of muscle fatigability using isometric repetitive handgrip strength in frail older adults. A cross-sectional study. *Journal of Translational Medicine*, 23(1), 215, 2025.

Kidgell, D.J., Stokes, M.A., Castricum, T.J. and Pearce, A.J., Neurophysiological responses after short-term strength training of the biceps brachii muscle. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(11), 3123-3132, 2010.

Kim, J.Y., Chung, M.K. and Park, J.S., Measurement of physical work capacity during arm and shoulder lifting at various shoulder flexion and ad/abduction angles. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 13(2), 153-163, 2003.

Konrad, P., The abc of emg. *A practical introduction to kinesiological electromyography*, 1(2005), 30-35, 2005.

Law, L.A.F., Lee, J.E., McMullen, T.R. and Xia, T., Relationships between maximum holding time and ratings of pain and exertion differ for static and dynamic tasks. *Applied Ergonomics*, 42(1), 9-15, 2010.

Leonardis, J.M., Alkayyali, A.A. and Lipps, D.B., Posture-dependent neuromuscular contributions to three-dimensional isometric shoulder torque generation. *Journal of Neurophysiology*, 123(4), 1526-1535, 2020.

Masuda, K., Masuda, T., Sadoyama, T., Inaki, M. and Katsuta, S., Changes in surface EMG parameters during static and dynamic fatiguing contractions. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 9(1), 39-46, 1999.

Mathiassen, S.E. and Winkel, J., Physiological comparison of three interventions in light assembly work: reduced work pace, increased break allowance and shortened working days. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 68(2), 94-108, 1996.

Motabar, H. and Nimbarte, A.D., The effect of task rotation on activation and fatigue response of rotator cuff muscles during overhead work. *Applied Ergonomics*, 97, 103461, 2021.

Nimbarte, A.D., Aghazadeh, F., Ikuma, L. and Sun, Y., Evaluation of the loading of neck and shoulder musculature in overhead pushing and pulling exertions. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 22(4), 317-327, 2012.

Nussbaum, M.A., Clark, L.L., Lanza, M.A. and Rice, K.M., Fatigue and endurance limits during intermittent overhead work. *AIHAJ-American Industrial Hygiene Association*, 62 (4), 446-456, 2001.

Palmerud, G., Forsman, M., Sporrong, H., Herberts, P. and Kadefors, R., Intramuscular pressure of the infra-and supraspinatus muscles in relation to hand load and arm posture. *European Journal of Applied Physiology*, 83(2), 223-230, 2000.

Rashedi, E. and Nussbaum, M.A., Cycle time influences the development of muscle fatigue at low to moderate levels of intermittent muscle contraction. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 28, 37-45, 2016.

Shin, S.J., Yoo, W.G. and Kim, T.Y., Effects of different overhead work conditions on the neck and shoulder muscles. *Journal of Physical Therapy Science*, 24(2), 197-199, 2012.

Smith, J., Padgett, D.J., Kaufman, K.R., Harrington, S.P., An, K.N. and Irby, S.E., Rhomboid muscle electromyography activity during 3 different manual muscle tests. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(6), 987-992, 2004.

Wiker, S.F., Chaffin, D.B. and Langolf, G.D., Shoulder posture and localized muscle fatigue and discomfort. *Ergonomics*, 32(2), 211-237, 1989.

Author listings

Kyeong-Hee Choi: ckhee@kitech.re.kr
Highest degree: Ph.D, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Position title: Senior Researcher, Regional Industrial Innovation Department (ESH), Korea Institute of Industrial Technology
Areas of interest: Physical ergonomics, Musculoskeletal disorders, Work-load evaluation

Jeong-Bae Ko: duckbaeya@kitech.re.kr
Highest degree: Ph.D candidate, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Position title: Researcher, Regional Industrial Innovation Department (ESH), Korea Institute of Industrial Technology
Areas of interest: Physical ergonomics, Data Science

Jae-Soo Hong: jshong94@kitech.re.kr
Highest degree: Ph.D, Department of Biomedical Engineering, Korea University
Position title: Principal Researcher, Regional Industrial Innovation Department (ESH), Korea Institute of Industrial Technology
Areas of interest: Digital Healthcare Device, Silver Product