JESK J Ergon Soc Korea 2023; 42(6): 523-537
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2023.42.6.523
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Developing an Evaluation Tool for Assessing Workloads of Worker's Upper Trapezius (UT) Muscle using Amplitude Probability Distribution Function (APDF)

Yong-Ku Kong[1], Hyun-Ho Shim[1], Seungjae Son[1], Donghyun Park[2], Hyunji Keum[1]

[1]Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419
[2]Department of Industrial Engineering, Inha University, Incheon, 22212

APDF를 활용한 작업 부담 수준 별 작업자의 승모근에 대한 근육 부담 평가도구 개발

공용구[1], 심현호[1], 손승재[1], 박동현[2], 금현지[1]

[1]성균관대학교 산업공학과
[2]인하대학교 산업경영공학과

Corresponding Author
Hyunji Keum
Department of Industrial Engineering,
Sungkyunkwan University, Suwon, 16419
Email : khz1996@naver.com

Received : July 28, 2023
Revised : October 31, 2023
Accepted : November 07, 2023

Copyright@2023 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: The aim of this study is to develop and validate an evaluation tool that can evaluate trapezius muscle workloads to prevent musculoskeletal disorders (MSDs) in workers.

Background: The number of musculoskeletal disorders among workers in industrial sites is increasing every year, and it is necessary to develop an assessment tool for evaluating muscle workloads to reduce MSDs.

Method: Ten adult men who had no musculoskeletal disorders were recruited and performed drilling tasks for six working heights. The EMG was attached to the upper trapezius (UT), and the EMG data was used to extract 50%- and 90%-iles values for the six working heights to derive the amplitude probability distribution function (APDF) ranges, then, an assessment tool was developed to evaluate muscle loads using the APDF ranges. To validate the evaluation tool, it was applied to industrial sites in two ways; (1) Comparison of muscle loads by difficulty level, (2) Comparison of muscle loads in different ways of working with the same difficulty level.

Results: An evaluation tool has been developed to evaluate muscle loads at four workload levels (low-, medium-, high-, and very high-risk levels) of APDF-50 and APDF-90, respectively. The final muscle loads were divided into four levels: Level 1- *'good'*, Level 2- *'normal'*, Level 3- *'caution'*, and Level 4- *'risk'*. The results of the validation study showed that when evaluating the muscle loads for different levels of difficulties, the muscle load score of the overhead working height task was higher than that of the chest height task. In addition, when evaluating different work methods with the same difficulty levels, the muscle load score without the exoskeleton task was higher than that of with exoskeleton task.

Conclusion: An assessment tool for evaluating muscle loads with a range of APDF-50 and 90 by workload levels was developed and validated based on the different levels of working difficulty as well as the working method in this study.

.

Application: The results of this study are expected to understand and prevent musculoskeletal disorders by enabling a comparative evaluation of workers' muscle load by workload level.

Keywords: Muscle load, Musculoskeletal Disorders (MSDs), Electromyography (EMG), Amplitude Probability Distribution Function (APDF), Workload level

1. Introduction

산업 현장에서 발생하는 작업관련 근골격계 질환은 매년 증가하는 추세를 보이고 있다(Kim et al., 2008). 특히, 상지와 허리 부위에 근골격계 질환 유병률이 빈번하게 발생하고 있고, 이러한 원인은 부적절한 자세, 반복적인 작업 또는 과도한 힘과 진동 등과 같은 인간공학적 요인들과 함께(Punnett and Wegman, 2004; Kim et al., 2009; Da Costa and Vieira, 2010), 신체적 조건, 작업 조건, 환경 등의 요인이 복합적으로 발생하여 나타난다(Lee et al., 2005). 국내에서는 다양한 산업 분야에 종사하고 있는 작업자의 근골격계 질환 발생 원인에 대한 연구와 물리적 및 사회심리적 요소에 대한 근골격계 질환 조사가 수행되어 왔지만(Bongers et al., 1993; Devereux et al., 2002; Kim et al., 2004; Choi et al., 2012), 이에 대한 원인 조사만 이루어지고 있을 뿐, 근골격계 질환의 근본적인 예방에 관한 연구는 비교적 부족한 실정이다.

작업자의 근골격계 질환 예방을 위해 근전도 신호를 기반으로 근피로도를 측정하여 작업 시의 부하를 파악하는 방법으로 진폭(amplitude) 분석법과 주파수(frequency) 분석법이 있다. 근피로도 분석에 흔히 사용하는 주파수 분석법은 신호의 안정성이 보장되었을 때 사용이 가능하고, 분석 결과 해석 시 주의가 필요하다는 한계점이 있다(Blanco et al., 1995; Cho and Kim, 2010). 반면, 진폭 분석법은 일반적으로 사용하는 방법은 아니지만, 근전도 신호의 진폭을 분석하는 방법으로 해당 근육의 직접적인 부하를 나타내는 척도이며, 시간에 따른 근육 사용량의 변화 관찰이 가능하다는 장점을 갖고 있다(Lee et al., 2019). 본 연구에서는 진폭 분석법을 이용한 Amplitude Probability Distribution Function (APDF)을 분석하여 근육 부담 평가 모델 개발에 활용하고자 한다.

APDF는 근전도 신호를 이용하여 작업 부담 수준 별 전체 작업 시간 동안 발휘한 힘의 크기 값을 나타내는 모델로 근피로도 예측 및 측정이 가능한 모델이다(Jonsson, 1982). Figure 1과 같이, 근육의 전기적 신호에 대한 RMS (Root mean square) 값의 진폭확률(amplitude probability)을 크기 순서대로 회귀시켜 누적된 진폭확률로 나타낼 수 있다(Oh et al., 2012). APDF는 load level 즉, 전체 작업 시간 중 해당하는 근활성도 수준으로 구분할 수 있는데, APDF-10은 10%MVC로 작업 시간 동안 기록된 정적(static) 수준의 근활성도, APDF-50은 50%MVC로 중간 수준, APDF-90은 90%MVC로 최대 수준의 근활성도로 정의된다(Jonsson, 1982).

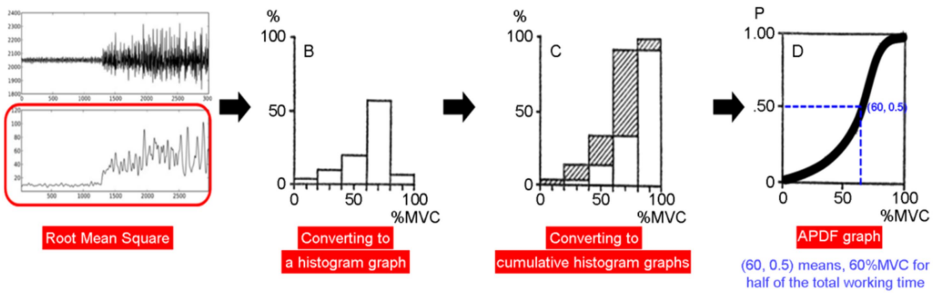

Figure 1. The process of APDF Graph

기존 대부분의 APDF에 대한 연구는 어깨 부위에 대해 진행되어, 어깨 부위에 대한 근육 활동 별 범위가 다양하게 도출된 것을 확인할 수 있으며, 작업 난이도가 다른 작업군에 대한 비교 연구로도 활용되어(Larivière et al., 2005; Schleifer et al., 2008; Motamedzade et al., 2014) 다양한 작업에 대한 근육 부담 평가를 진행하기에 적합할 것으로 사료된다. 다만, 기존 문헌을 통해 도출된 작업 부담 별 근

육 활동 수준에 대한 범위 값을 산업 현장에 바로 적용하기에는 한계점이 있다. 첫 번째, 근육 활동 별 범위 값이 연속적이지 않고 평가가 어려운 공백 구간 또는 중복되는 구간이 존재하여 평가 도구에 적용하기 어렵다고 판단된다. Winkel and Westgaard (1992)의 논문을 기반으로 15가지 문헌을 조사한 결과(Table 1), 근육 부담 수준 별 근육 활동 범위 값을 확인하였으나, 이 때 근육 활동 범위는 최대 36%MVC까지에 대해서만 도출되었고, 범위 사이 공백 또는 겹치는 부분이 있음을 확인할 수 있었다(Hagberg, 1979; Bjelle et al., 1981; Hagberg et al., 1983; Winkel et al., 1983a, b; Christensen, 1986; Hagberg and Sundelin, 1986; Westgaard et al., 1986; Aarås and Westgaard, 1987; Winkel and Gard, 1988; Jørgensen et al., 1989; Veiersted et al., 1990; Winkle, 1990; Waersted and Westgaard, 1991). 두 번째로는, 기존 논문 별 범위 값이 다르기 때문에(Grandjean, 1988; Jonsson, 1988), 산업 현장에 적합한 범위 선정이 어려워 평가 도구에 적용하기 어렵다고 판단된다(Table 2).

Table 1. APDF Ranges derived from the literature survey

	Low-risk	Medium-risk	High-risk
APDF-10 (%MVC)	2~3	3~10	8~12
APDF-50 (%MVC)	4~8	10~15	12~25
APDF-90 (%MVC)	8~12	18~35	26~36

Table 2. Range of %MVC of a literature survey

	APDF10	APDF50	APDF90
Grandjean, 1988	8~15%MVC	< 30%MVC	
Jonsson, 1988	2~5%MVC	10~14%MVC	50~70%MVC

따라서, 본 연구의 목적은 다음과 같이 두 가지이다. 첫 번째, 작업 부담 수준 별 상부승모근의 APDF 범위를 정의하고, 이를 활용하여 산업 현장에 적용 가능한 근육 부담 평가도구를 개발하고자 한다. 두 번째, 산업 현장 적용 가능성을 확인하기 위해 다양한 난이도에 따른 근육 부담 비교와 동일 난이도에 대한 다양한 작업 방식에 따른 근육 부담 비교를 통해 평가도구를 검증하고자 한다.

2. Methods

2.1 Participants

본 연구는 전신에 근골격계 질환이 없는 건강한 성인 남성 10명을 대상으로 진행하였으며, 피험자의 연령, 신장, 체중과 관련된 정보는 Table 3과 같다.

Table 3. Anthropometric data of the participants (mean ± standard deviation)

Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)
24.2±1.2	176.2±3.7	73.5±10.2

2.2 Experimental conditions

실제 자동차 조립라인의 111개 작업들을 분석한 결과, 허리 아래 및 무릎 굽힘 작업을 제외하면, 허리 높이(23.4%)와 머리 위 높이

(26.1%)에서의 작업을 빈번히 수행하는 것으로 파악되었다. 본 연구에서는 상부승모근의 근육 부담을 평가하기 위한 실험 환경 구축을 위해 Size Korea 데이터를 활용하여 허리 높이 작업은 허리 기준선 높이, 그리고 머리 위 작업은 머리 위 뻗은 주먹 높이로 정의하였다(Figure 2).

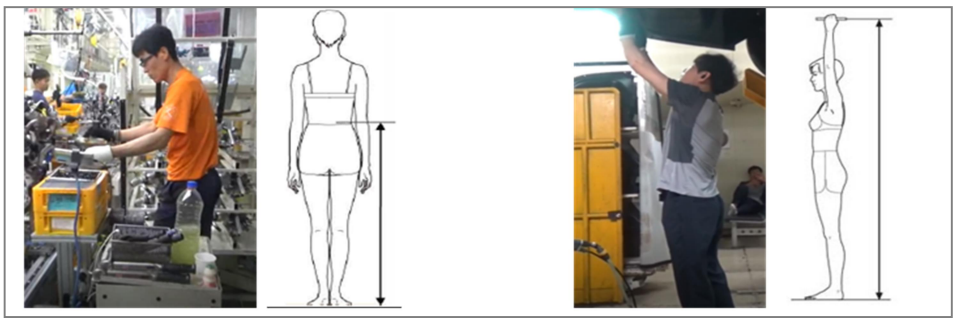

Figure 2. Task working heights in the automotive assembly line. [waist-height task (left) vs. overhead-height task (right)]

Size Korea 7th Anthropometric data (20~59세 50%ile) 기반, 남성의 허리 기준선 높이와 머리 위 뻗은 주먹 높이는 각각 110cm와 205cm이었으며, 허리 기준선 높이를 최소, 머리 위 뻗은 주먹 높이는 최대 높이로 정의한 후, 두 높이 사이를 6가지 수준으로 나누어 작업 높이를 선정하였다. 그 결과 1수준에서 6수준까지의 작업 높이는 110, 130, 150, 170, 190, 205cm로 각각 선정되었다. 선정된 높이 수준에 따라 작업 프레임을 Figure 3과 같이 설계 및 제작하였으며, 가장 높은 2가지(190, 205cm) 작업은 overhead 자세로 작업을 수행하였고, 그 외 4가지 높이(110, 130, 150, 170cm)는 측면 자세로 작업을 수행하였다.

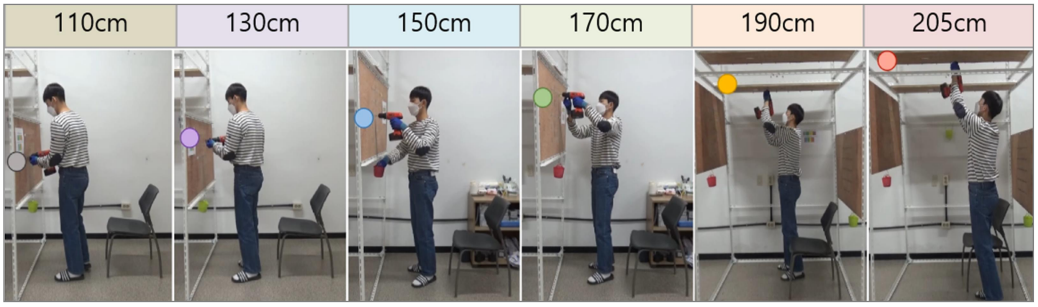

Figure 3. Working heights of the experimental task in this study

본 실험에서 산업 현장의 주 작업형태인 drilling Task를 수행하였으며, 공구로는 전동 드릴(JAYA, JMD-150)을 사용하였다. 전동 드릴의 무게는 실제 자동차 조립라인의 111개 작업에서 사용하고 있는 전동 드릴의 평균 무게(1.7kg)와 유사한 1.5kg을 사용하였다.

2.3 Apparatus

2.3.1 Electromyography (EMG)

상부승모근(Upper Trapezius, UT)의 근전도 데이터 수집을 위해서, 본 연구에서는 무선 근전도 센서 TeleMyo 2400 DTS System (Noraxon, Arizona, USA)를 사용하였다. SENIAM (Surface Electromyography for the Non-Invasive Assessment of Muscle)의 가이드라인에 근거하여

피실험자의 주력손 쪽, 상부승모근에 근전도 센서를 부착하였다.

모든 피험자는 상부승모근에 대해 최대 힘(Maximum Voluntary Contraction, MVC)을 발휘하여 이를 5초씩 총 2회 진행하였으며, 앞 뒤 1초를 제외한 중간 3초의 평균값을 최대 힘으로 적용하여 정규화에 사용하였다(Hermens et al., 1999; Johansen et al., 2013; Kong et al., 2023). 근전도 데이터는 1,500Hz로 수집하였으며, band-pass filtering (20~400Hz) 후, electrocardiogram (ECG) 필터를 사용하여 심장 박동의 요소를 최대한 제거하였다. 수집된 근전도 데이터(raw EMG data)는 MATLAB R2021b (Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, USA) 프로그램을 사용하여 APDF-50과 90 값을 도출하였다. 데이터는 피험자의 주력손 쪽에 해당하는 상부승모근에 대해서 분석을 진행하였으며, 주력손 쪽은 피험자가 전동 드릴을 사용한 쪽으로 정의하였다.

2.3.2 Amplitude Probability Distribution Function (APDF)

APDF는 근전도 신호를 이용하여 작업 부담 수준 별 전체 작업 시간 동안 발휘한 힘의 크기 값을 나타내는 모델로 근피로도 측정이 가능한 모델이다(Jonsson, 1982). 즉, 근육의 다양한 작업 부담 수준에서 근육의 분포 정도를 분석함으로써 해당되는 근육의 피로도를 평가할 수 있다는 장점을 갖고 있다(Hagberg, 1979).

APDF는 근육의 전기적 신호에 대한 RMS (root mean square) 값의 진폭확률(amplitude probability)을 크기 순서대로 회귀시켜 누적된 진폭확률로 나타낼 수 있다(Oh et al., 2012). APDF에서 작업 부담(exposure level)이란 작업의 난이도를 뜻하며 저, 중, 고-위험으로 분류한다. 저-위험 작업은 VDT 작업과 같이 양호한 작업 환경에서 앉아서 작업이 가능한 작업, 중-위험 작업은 의류 공장과 같이 목과 어깨에 부담이 가는 작업, 고-위험 작업은 중량물 취급 작업으로 정의한다(Winkel and Westgaard, 1992). 또한, 근육 활동(load level)이란 전체 작업 시간 중 해당하는 근활성도 수준을 뜻하며, APDF-10은 10%MVC로 작업 시간 동안 기록된 정적(static) 수준의 근활성도, APDF-50은 50%MVC로 중간 수준, APDF-90은 90%MVC로 최대 수준의 근활성도로 정의한다(Jonsson, 1982). 따라서, Figure 4와 같이 APDF 그래프의 유형이 오른쪽으로 치우칠수록 높은 근활성도의 비율이 많음을 뜻하여 근피로도가 높은 위험 작업군이라고 해석할 수 있다(Jonsson, 1982). 본 연구에서 APDF-10은 그 값이 작고, 통계적으로 유의하지 않기 때문에 이를 제외한 APDF-50, 90 값을 사용해 평가도구를 개발하고자 한다.

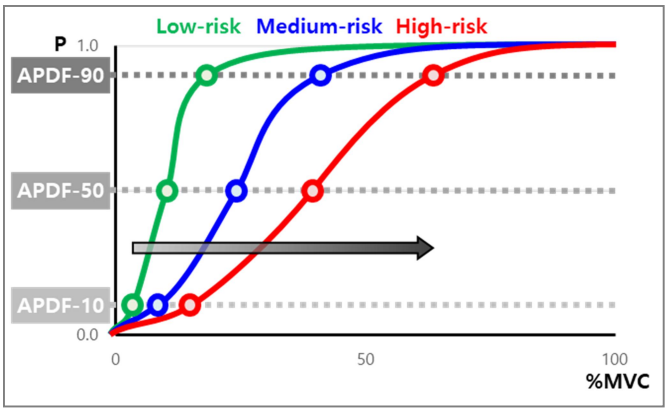

Figure 4. Exposure levels associated with the APDF types

2.4 Experimental procedure

실험을 시작하기에 앞서, 피험자에게 실험의 목적과 절차 등과 같은 실험 정보를 안내하였다. 그 후 피험자의 신체 사이즈(연령, 신장, 체중 등)를 측정하였으며, 근전도 센서 부착 후 실험을 진행하였다.

본 연구는 산업 현장과 유사한 환경을 구현하기 위해 다양한 높이에 대한 프레임을 설치하여 drilling task를 수행하였다. 전동 드릴은

피험자의 주력손을 사용하도록 하였으며, drilling task는 1분을 주기로 40초 작업수행, 20초 휴식을 반복하여 진행하였고, 높이 별 작업은 각각 30분씩 임의의 순서로 수행하였다. 40초 작업수행 시간은 자동차 조립라인 111개 작업 분석 결과를 기반으로, 작업자가 1회 drilling Task 평균 수행시간(40.3sec)을 반영하였다. 근육의 피로도 영향을 최소화하기 위해 각 작업 이후, 5분간의 휴식 시간을 제공하였다.

2.5 Statistical analysis

통계 분석은 SPSS 20 (SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)을 이용하여 분석하였으며, 작업 높이에 따른 근활성도(EMG)는 일원배치 분산분석(One-way Analysis of Variance, One-way ANOVA)으로 수행하였고, Tukey HSD와 Duncan을 사용하여 사후 분석을 수행하였다. 이 때, 유의 수준은 0.05로 설정하였다. 독립 변수는 작업 높이(110, 130, 150, 170, 190, 205cm), 종속 변수는 근전도(%MVC)를 선정하여, APDF-50과 90으로 데이터 분석을 진행하였다.

3. Results

3.1 Analysis of electromyography

작업 높이에 대한 APDF-50과 90의 평균 근활성도는 통계적으로 유의하였다(p<0.05). APDF-50 결과, 높은 작업 높이 190과 205cm에서 가장 큰 근활성도(22.5, 26.2%MVC)를 보인 반면, 작업 높이(110, 130cm)에서 가장 낮은 근활성도(2.0, 6.0%MVC)를 보였다. APDF-90의 결과 또한, APDF-50과 유사한 경향을 보였다. 즉, 205cm에서 75.0%MVC를 보인 반면, 110, 130cm에서는 각각 낮은 근활성도인 5.7, 11.8%MVC를 보였다(Table 4). 일반적으로 작업 높이가 높아짐에 따라 근육의 활성도는 함께 높아지는 경향을 보였다.

Table 4. Mean values of APDF-50 and 90 for working heights

	110cm	130cm	150cm	170cm	190cm	205cm
APDF-50	2.0^{C}	6.0^{C}	15.1^{B}	21.0^{AB}	22.5^{A}	26.2^{A}
APDF-90	5.7^{D}	11.8^{D}	31.2^{C}	47.3^{BC}	50.4^{B}	75.0^{A}

수집된 근전도 데이터를 기반으로 근육 부담 평가도구를 위한 그래프는 Figure 5와 같이 나타났다. 작업 높이가 증가할수록 즉, 작업수행을 위한 승모근의 근활성도가 클수록, APDF 그래프는 오른쪽으로 치우치는 경향이 나타나는 반면, 작업 높이가 비교적 낮은 110cm 또는 130cm의 경우의 그래프는 가장 좌측에 위치하였다.

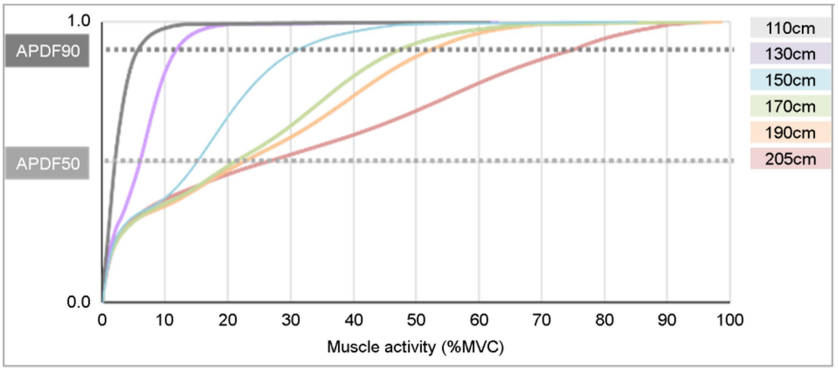

Figure 5. APDF trends for working heights

3.2 Development of an evaluation tool for muscle loads

Step 1. 작업 부담 수준 정의

APDF-50 근활성도 데이터 기반, 작업 높이 별 작업 부담 수준(난이도)을 분류하기 위한 사후분석 결과, 205^{A}cm (26.2%MVC), 190^{A}cm (22.5%MVC), 170^{AB}cm (21.0%MVC), 150^{B}cm (15.1%MVC), 130^{C}cm (6.0%MVC), 110^{C}cm (2.0%MVC)로 도출되었으며, 이를 기반으로 낮은 근활성도 순으로 110cm와 130cm는 저위험(low-risk-level), 150cm는 중위험(medium-risk-level), 170cm는 고위험(high-risk-level), 190, 205cm는 최고위험(very high-risk-level)으로 총 4개의 부담 수준으로 분류하였다(Figure 6, left).

APDF-90 근활성도 데이터 기반, 작업 높이 별 작업 부담 수준을 분류하기 위한 사후분석 결과, 205^{A}cm (75.0%MVC), 190^{B}cm (50.4%MVC), 170^{BC}cm (47.3%MVC), 150^{C}cm (31.2%MVC), 130^{D}cm (11.8%MVC), 110^{D}cm (5.7%MVC)로 도출되었으며, 이를 기반으로 낮은 근활성도 순으로 110cm와 130cm는 저위험(low-risk-level), 150cm는 중위험(medium-risk-level), 170cm와 190cm는 고위험(high-risk-level), 205cm는 최고위험(very high-risk-level)으로 총 4개의 부담 수준으로 분류하였다(Figure 6, right).

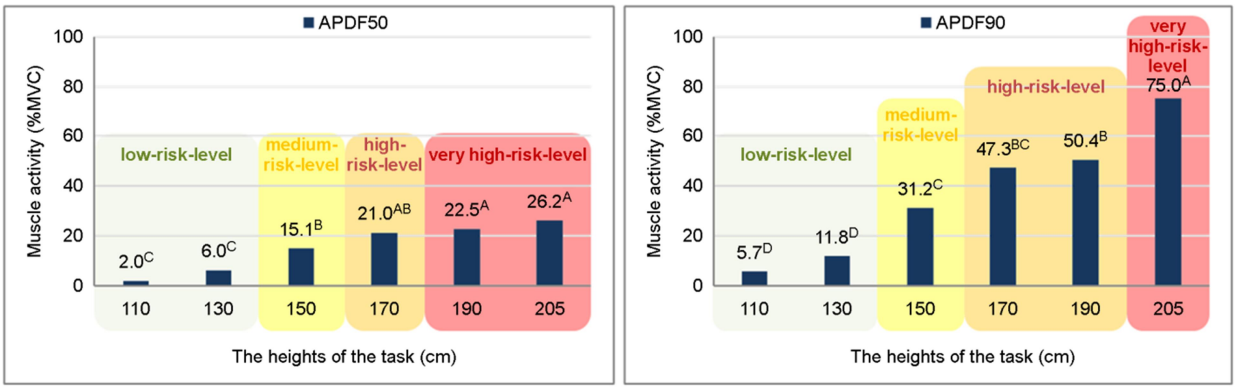

Figure 6. Classifications of risk levels for working heights (APDF-50, left; APDF-90, right)

Step 2. 작업 부담 수준 별 APDF 범위 정의

Step 2에서는, Step 1에서 정의한 APDF-50과 APDF-90의 작업 높이 별 작업 부담 수준(저/ 중/ 고/ 최고 위험)을 기반으로 APDF 범위를 정의하였다.

Step 1에서 저위험군은 APDF-50과 90 모두 110, 130cm로 분류되었으므로, 저위험 수준 APDF-50의 가이드라인은, 0.0~6.0%MVC, APDF-90의 가이드라인은 0.0~11.8%MVC로 정의하였다. 중위험군 역시, APDF-50과 90 모두 150cm로 정의되었으므로, 중위험 수준 APDF-50의 가이드라인은 6.0~15.1%MVC, APDF-90의 가이드라인은 11.8~31.2%MVC로 도출하였다. 고위험 군의 경우, APDF-50은 170cm로, APDF-90은 170cm와 190cm로 정의되었으므로, 고위험 수준 APDF-50의 가이드라인은 15.1~21.0%MVC과 APDF-90의 가이

Table 5. APDF-50 & 90 ranges for the risk levels

	Low-risk-level	Medium-risk-level	High-risk-level	Very high-risk-level
APDF-50 (%MVC)	0~6.0	6.0~15.1	15.1~21.0	21.0~100
APDF-90 (%MVC)	0~11.8	11.8~31.2	31.2~50.4	50.4~100

드라인은 31.2~50.4%MVC로 각각 정의하였다. 끝으로, 최고위험군의 경우, APDF-50은 190cm와 205cm로, APDF-90은 205cm로 정의되었으므로, 최고위험 수준 APDF-50의 가이드라인은 21.1~100%MVC, APDF-90의 가이드라인은 50.4~100%MVC로 정의하였다(Table 5).

Step 3. 근육 부담 평가 Table

Step 2에서 정의된 APDF 범위를 적용하여 APDF-50과 90의 조합으로 이루어진 근육 부담을 평가하는 도구로 Table 6을 제안하였다. 근육 부담 평가 방법은 다음과 같다.

근육 부담 평가를 위한 위험 수준 점수 도출 방법은 크게 두 가지 단계로 도출된다. 우선, 평가 근육의 APDF-50%와 APDF-90%MVCs 데이터를 각 부담 수준 별(low-, medium-, high-, and very high-risk-level) 가이드라인을 기반으로 부담 수준(1~4수준) 중 하나를 각각 도출한다.

예를 들어, 해당 작업자의 전체 시간 동안 측정된 근활성도 결과 APDF-50이 13.0%MVC 그리고 APDF-90이 44.0%MVC라면, 작업자의 근육 부담 평가 Table 3에서 APDF-50은 medium-risk-level (6.0~15.1%MVC)이므로 부담 수준 2, APDF-90은 high-risk-level (31.2~50.4%MVC)에 속하므로 부담 수준 3에 해당한다. 다음 단계로, 도출된 두 개의 부담 수준 중 더 높은 쪽의 부담 수준을 최종 근육 부담 수준으로 도출한다. 즉, 작업자의 경우 APDF-50: 수준 2, APDF-90: 수준 3이므로, 본 작업의 최종 부담 수준은 3수준으로 평가하게 된다.

최종 근육 부담 수준은 4-level로 나뉘었으며, level-1은 양호, level-2는 보통, level-3는 주의, 그리고 level-4는 위험 상태로 판별한다. 각 level에 따른 조치 수준으로는 level-1(양호)은 '현 자세 유지 가능', level-2(보통)은 '현 자세 유지 가능하나 적절한 자세로 변경 요망', level-3(주의)은 '현 자세 유지 어려움, 적절한 자세로 변경 필요', level-4(위험)은 '즉시 적절한 자세로 변경 필수'로 해석할 수 있다.

Table 6. Assessment table of risk levels

			APDF-90			
			Low-risk-level (0~11.8%MVC)	Medium-risk-level (11.8~31.2%MVC)	High-risk-level (31.2~50.4%MVC)	Very high-risk-level (50.4~100%MVC)
			1	2	3	4
APDF-50	Low-risk-level (0~6.0%MVC)	1	1	2	3	4
	Medium-risk-level (6.0~15.1%MVC)	2	2	2	3	4
	High-risk-level (15.1~21.0%MVC)	3	3	3	3	4
	Very high-risk-level (21.0~100%MVC)	4	4	4	4	4

3.3 Validation of the assessment tool

3.2절에서 도출된 평가도구(Table 6)를 검증하기 위해, 산업 현장인 자동차 조립라인의 실제 작업을 적용하였다. 20대 남성 10명을 대상으로 평가하였고, 다음과 같이 2가지 방법을 수행하였다.

- **Application 1:** 난이도가 상이한 두 작업(가슴 높이 작업 vs. 머리 위 높이 작업)에 대해 작업자의 근활성도와 근육 부담 점수 비교

를 진행하여, 서로 다른 난이도 작업에 대한 평가가 가능한 지를 분석하였다.

- **Application 2:** 난이도가 동일한 작업에 대해 작업을 수행하는 방법(외골격 미착용 vs. 착용)에 대해, 외골격 착용 여부에 따른 근육 부담 경감 효과에 대한 평가가 가능한 지를 분석하였다.

Application 1. 난이도 별 근육 부담 비교(가슴 높이 작업 vs. 머리 위 높이 작업)

피험자는 가슴 높이 작업과 머리 위 높이 작업을 Figure 7과 같이 각각 30분 동안 수행한 후, 승모근의 평균 APDF-50과 90의 데이터에 대한 분석 결과는 Figure 8과 같다.

- 가슴 높이에서의 drilling task 수행 시 근활성도를 측정한 결과, 상부승모근의 평균 APDF-50과 90은 각각 17.2%MVC와 40.2%MVC가 도출되었다. 이는 Table 6에 따라, APDF-50와 90 모두 3수준으로 최종 부담수준 3으로(현 자세 유지 어려움, 적절한 자세로 변경 필요) 평가되었다.

- 반면, 머리 위 높이에서의 drilling task 수행 시 근활성도를 측정한 결과, 상부승모근의 평균 APDF-50과 90은 각각 22.8%MVC와 65.4%MVC가 도출되었다. 이는 Table 6에 따라, APDF-50과 90 모두 4수준으로 최종 위험 수준 4로(즉시 적절한 자세로 변경 필수) 평가되어, 가슴 높이에서의 drilling task의 작업이, 머리 위 높이에서의 작업보다 승모근의 근육 부담이 경감되는 결과를 보였다.

Figure 7. Drilling tasks for chest height drilling task (left) and overhead height drilling task (right)

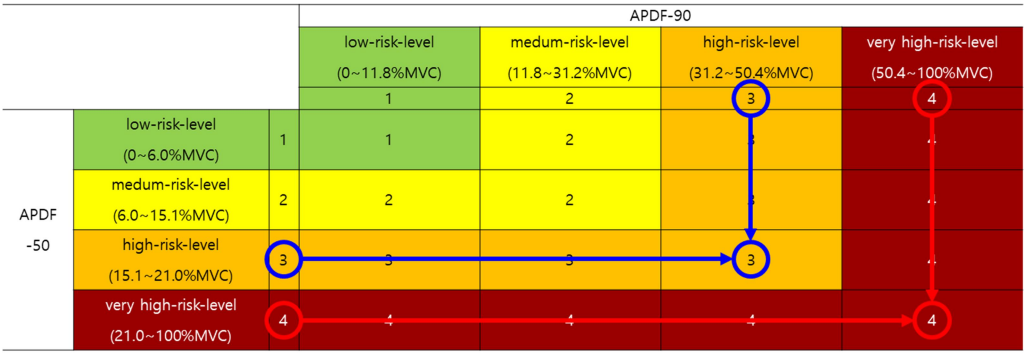

Figure 8. Assessment of risk levels for chest height (blue circle) vs. overhead height (red circle) tasks

Application 2. 동일한 작업에 대한 외골격 착용 여부(w/o EXO vs. w/ EXO)에 따른 근육 부담 비교

피험자는 머리 위 높이 작업을 Figure 9와 같이 상지 외골격(CEX) 착용과 미착용 작업을 각각 30분 동안 수행한 후, 승모근의 평균 APDF-50과 90의 데이터에 대한 분석 결과는 Figure 10과 같다.

- 외골격 보조도구를 착용하지 않고 작업을 수행한 작업자의 근활성도 측정 결과, 상부승모근의 평균 APDF-50과 90은 각각 22.8%MVC와 65.4%MVC가 도출되었다. 이는 Table 6에 따라, APDF-50과 90 모두 4수준으로 최종 위험 수준 4로(즉시 적절한 자세로 변경 필수) 평가되었다.

- 반면, 외골격 보조도구를 착용하고 작업을 수행한 작업자의 근활성도 측정 결과, 상부승모근의 평균 APDF-50과 90은 각각 17.6%MVC와 31.2%MVC로 나타났다. 이는 Table 6에 따라, APDF-50과 90 각각 3수준과 2수준으로 최종 위험 수준 3으로(현 자세 유지 어려움, 적절한 자세로 변경 필요) 평가되어, 동일한 작업을 수행하더라도 외골격을 착용하고 작업하는 경우, 착용하지 않고 작업하는 경우보다 승모근의 근육 부담이 더 경감되는 효과가 있음을 보였다.

Figure 9. Overhead height drilling task without EXO (left) vs. with EXO (right)

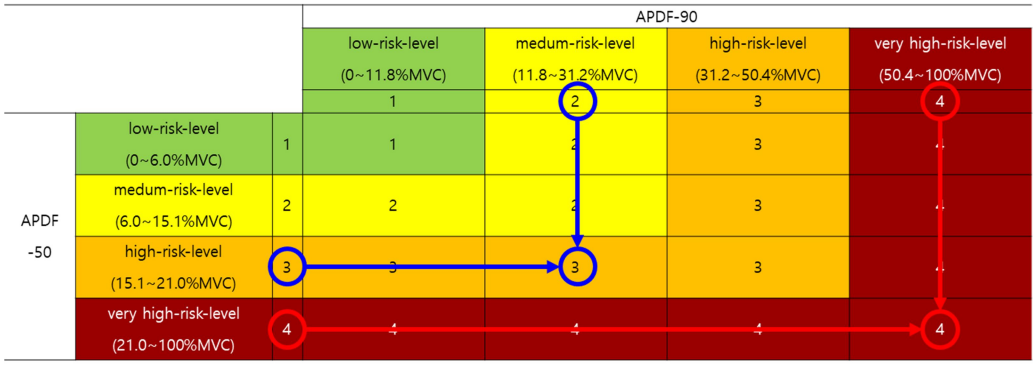

Figure 10. Assessment of risk levels for w/ EXO (blue circle) vs. w/o EXO (red circle) tasks

4. Discussion

본 연구에서는 작업자의 근육 부담 평가도구를 개발 및 검증하기 위해, 6가지의 작업 부담 수준에 대해 APDF 범위를 선정한 후, APDF-50과 90의 조합으로 근육 부담 평가 도구(Table 6)를 도출하였다. 또한, 도출된 평가도구를 검증하고자 실제 산업 현장의 자동차

조립라인 작업에 적용하여, 난이도 별 근육 부담 비교와 동일 작업에 대한 외골격 착용 여부에 따른 근육 부담 비교를 수행하였다.

기존 연구에서도 어깨 부위의 근육 활동 수준에 대한 범위를 Table 1과 2와 같이 도출하였으나, 기존 연구는 APDF-10, 50, 90에 따른 3가지 위험 수준(저, 중, 고)으로 범위를 구분한 반면, 본 연구에서는 Table 5와 같이 APDF-50, 90에 따른 4가지 위험 수준(저, 중, 고, 최고)으로 구분하였다. 또한, 기존 연구에서는 APDF-50, 90의 저위험 수준과 중위험 수준 사이에 공백이 있거나, 중위험 수준과 고위험 수준 사이의 값이 중복되는 경우가 있어, 본 연구에서는 이러한 기존 연구의 문제점을 보완하였다.

근전도 분석의 결과로는 작업자의 APDF-50과 90에서 모두 작업 높이가 증가할수록 근활성도의 값도 함께 증가하는 경향이 나타났다. 이는 높이가 증가할수록 어깨의 굴곡 증가로 인한 결과라고 판단할 수 있다. 또한 6가지 작업 높이 별 APDF 그래프는 높이가 증가할수록 우측으로 이동하는 경향이 나타났고, 가장 높은 높이(205cm)가 가장 오른쪽으로 치우쳤다. 이를 해석하면 가장 높은 작업 높이가 가장 부담이 크고, 근피로도가 높은 작업군이라고 해석할 수 있다(Jonsson, 1982). 근육 부담 평가도구 개발 결과, 6가지 높이에 대해 작업 부담 수준(저, 중, 고, 최고) 별 APDF-50과 90의 평균을 이용하여 0~100%MVC 사이 연속적인 범위를 도출하였다. 또한, 해당 작업 근육의 APDF-50%MVC와 APDF-90%MVC 데이터에 해당하는 근육 부담 수준 1~4(즉, low-risk-level: 1; medium-risk-level: 2; high-risk-level: 3; very high-risk-level: 4) 중 하나를 각각 도출하였고, 최종 근육 부담 수준은 4-level로 나누어, level-1은 양호, level-2는 보통, level-3은 주의, 그리고 level-4는 위험 상태로 판별하였다. 따라서, 작업 부담 수준에 대한 근육 활동 별 상부승모근의 근육 부담 점수 평가도구를 통해 전체 작업에 대한 작업자의 근육 부담 수준의 평가가 가능하여 작업자의 근골격계 질환 예방에 도움을 줄 것으로 판단된다.

근육 부담 평가도구의 검증을 위한 실제 산업 현장 적용의 결과로는 첫 번째, 서로 다른 작업 난이도에 대한 평가 시, 가슴 높이 작업에 비해 머리 위 높이 작업의 근육 부담 평가 점수가 높게 도출된 것을 확인하였다. 이 때, 머리 위 높이 작업에 대한 APDF 그래프가 더 오른쪽으로 치우쳐져 있으며, 이는 머리 위 높이 작업이 가슴 높이 작업에 비해 근육 부담이 큰 작업이라고 볼 수 있고(Jonsson, 1982), 근육 부담 평가 점수의 결과와 동일한 경향을 보임을 확인하였다. 따라서 이를 통해 여러 난이도가 존재하는 산업 현장에 적용 가능성을 보였다. 두 번째, 동일한 난이도에 대한 외골격 보조도구 착용 여부에 따른 근육 부담 경감 효과에 대한 평가 결과, 외골격 보조도구를 착용하지 않은 작업이 착용한 작업보다 근육 부담 평가 점수가 더 높게 도출된 것을 확인하였다. 이 때, APDF 그래프 상에서도 외골격 미착용 작업이 더 오른쪽으로 치우쳐져 있으며, 이는 외골격 미착용 작업이 착용 작업에 비해 근육 부담이 더 큰 작업이라고 볼 수 있어, 외골격 보조도구 사용이 산업 현장에서 작업자들의 근육 부담 경감에 도움을 준다고 해석할 수 있다.

5. Conclusions

본 연구는 어깨(상부승모근)의 근전도를 이용하여 작업 부담 수준 별 APDF 범위를 도출하였고, 이를 기반으로 근육 부담 수준 평가 도구를 개발하고, 실제 산업 현장에 적용하여 평가도구의 적용 가능성을 검증하였다.

본 연구는 다음과 같이 3가지 의의를 가진다. 첫 번째, 근활성도 진폭(amplitude) 분석법을 활용해 근육 부담 평가도구를 개발하여 진폭을 활용한 근육 부담 측정의 가능성을 시사하였다. 두 번째, 서로 다른 수준의 작업 난이도에 대한 근육 부담 평가와 동일한 작업 난이도의 상이한 작업 방식에 대한 작업 부담 평가가 가능함을 보였다. 이러한 평가도구를 산업 현장에 적용한다면 작업 별 최적의 작업 방식을 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 작업자의 근골격계 질환 예방에 도움을 줄 것으로 사료된다. 세 번째, 본 연구에서 개발한 평가도구의 점수는 전체 작업 시간에 대한 중간 수준인 APDF-50과 최고 수준인 APDF-90의 복합적 사용으로 작업자의 근육 부담 평가가 과소 또는 과대 평가되는 문제를 방지하여 보다 정확한 평가 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 어깨(상부승모근)를 중심으로 하였기 때문에, 향후 다양한 상지 및 하지 근육을 포함한 전신 근육 부담 평가도구 개발 연구를 수행할 필요가 있다. 또한, 작업 부담 수준을 정의하기 위해 높이 별 drilling task만을 대상으로 하였기 때문에, 산업 현장의 또 다른 주 작업 형태를 분석하여 작업 부담 수준 정의를 고도화해야 할 것으로 보인다. 후속 연구에서는 피험자의 수를 늘리고, 평가도구의 실제 부담 피로도 반영 가능성을 재고하는 것이 바람직하며, 근육 부담 평가도구에 대해 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Acknowledgment

This work was carried out with the support of the "Cooperative Research Program for Agricultural Science and Technology Development" [Project No. RS-2022-RD010384 (PJ01709901)].

References

Aarås, A. and Westgaard, R.G., Further studies of postural load and Musculoskeletal injuries of workers at an electro-mechanical assembly plant, *Applied Ergonomics*, 18(3), 211-219, 1987.

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.

Blanco, S., Garcia, H., Quian, R., Quian, Q.R., Romanelli, L. and Rosso, O.A., Stationarity of the EEG series, *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 14, 395-399, 1995.

Bongers, P.M., de Winter, C.R., Kompier, M.A. and Hildebrandt, V.H., Psychosocial factors at work and musculoskeletal disease, *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 297-312, 1993.

Cho, Y.J. and Kim, J.Y., The effect of the signal stationarity on the EMG frequency analysis, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 29(2), 183-188, 2010.

Choi, Y., Lee, S.J., Song, J.C., Bae, K.J. and Park, H., Association between job-related factors and musculoskeletal symptoms in university hospital healthcare workers, *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 24(3), 217-228, 2012.

Christensen, H., Muscle activity and fatigue in the shoulder muscles of assembly-plant employees, *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 582-587, 1986.

Da Costa, B.R. and Vieira, E.R., Risk factors of work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies, *American Journal of Industrial Medicine*, 53(3), 285-323, 2010.

Devereux, J.J., Vlachonikolis, I.G. and Buckle, P.W., Epidemiological study to investigate potential interaction between physical and psychosocial factors at work that may increase the risk of symptoms of musculoskeletal disorder of the neck and upper limb, *Occupational and Environmental Medicine*, 59(4), 269-277, 2002.

Grandjean, E., "Fitting the task to the man: A textbook of Occupational Ergonomics", *Taylor and Francis*, New York, 1988.

Hagberg, M., The amplitude distribution of surface EMG in static and intermittent static muscular performance, *Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 40(4), 265-272, 1979.

Hagberg, N., Jonsson, B., Brundin, L., Ericson, B.E. and Örtelius, A., An epidemiological, ergonomic and electromyographic study of musculoskeletal complaints among meat-cutters, *Arbete och Haelsa (Sweden)*, 1983.

Hagberg, M. and Sundelin, G., Discomfort and load on the upper trapezius muscle when operating a word processor, *Ergonomics*, 29(12), 1637-1345, 1986.

Hermens, H.J., Freriks, B., Merletti, R., Stegeman, D., Blok, J., Rau, G., Disselhorst-Klug, C. and Hägg, G., European recommendations for surface electromyography, *Roessingh Research and Development*, 8(2), 13-54, 1999.

Johansen, T.I., Samani, A., Antle, D.M., Côté, J.N. and Madeleine, P., Gender effects on the coordination of subdivisions of the trapezius muscle during a repetitive box-folding task, *European Journal of Applied Physiology*, 113, 175-182, 2013.

Jonsson, B., The static load component in muscle work, *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 57(3), 305-310, 1988.

Jonsson, B., Measurement and evaluation of local muscular strain in the shoulder during constrained work, *Journal of Human Ergology*, 11(1), 73-88, 1982.

Jørgensen, K., Fallentin, N. and Sidenius, B., The strain on the shoulder and neck muscles during letter sorting, Journal of Industrial *Ergonomics*, 3(3), 243-248, 1989.

Kim, C.H., Yoon, H.Y., Moon, M.K. and Kim, D.S., "Development of Preventive Management Manual for Non-Manufacturing Firms", *In the Proceedings of the ESK Conference*, 223-227, 2008.

Kim, H.H., Park, H.J., Park, K.H., Kim, W., Yoo, C.Y., Kim, J.H. and Park, J.S., An Analysis of Characteristics of Musculoskeletal Disorders Risk Factors, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 28(3), 17-25, 2009.

Kim, I.A., Koh, S.B., Kim, J.S., Kang, D.M., Son, M., Kim, Y.K. and Song, J.C., The relationship between musculoskeletal symptoms and job stress & intensity of labor among shipbuilding workers, *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 16(4), 401-412, 2004.

Kong, Y.K., Park, S.S., Shim, J.W., Choi, K.H., Shim, H.H., Kia, K. and Kim, J.H., A passive upper-limb exoskeleton reduced muscular loading during augmented reality interactions, *Applied Ergonomics*, 109, 103982, 2023.

Larivière, C., Delisle, A. and Plamondon, A., The effect of sampling frequency on EMG measures of occupational mechanical exposure, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 15(2), 200-209, 2005.

Lee, C.G., Park, J., Park, J.S. and Sohn, S.J., Sociopsychological factors associated with symptoms of work-related musculoskeletal disease, *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 17(2), 104-115, 2005.

Lee, G.Y., Kim, S.H., Jo, J.H., Yoon, S.J. and Lee, S.S., Establishing EMG measurement system for measurement of motor nerve response in transcranial magnetic stimulation, *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, 12(4), 413-418, 2019.

Motamedzade, M., Afshari, D. and Soltanian, A., The impact of ergonomically designed workstations on shoulder EMG activity during carpet weaving, *Health Promotion Perspectives*, 4(2), 144, 2014.

Oh, H.S., Shin, H.K., Park, M.O., Choe, H.S., Moon, J.I. and Son, J.W., "Development of upper limb training and assessment systems for stroke patient rehabilitation using a driving simulator", *In the Proceedings of the ESK Conference*, 318-324, 2012.

Punnett, L. and Wegman, D.H., Work-related musculoskeletal disorders: the epidemiologic evidence and the debate, *Journal of*

Electromyography and Kinesiology, 14(1), 13-23, 2004.

Schleifer, L.M., Spalding, T.W., Kerick, S.E., Cram, J.R., Ley, R. and Hatfield, B.D., Mental stress and trapezius muscle activation under psychomotor challenge: A focus on EMG gaps during computer work, *Psychophysiology*, 45(3), 356-365, 2008.

Veiersted, K.B., Westgaard, R.H. and Andersen, P., Pattern of muscle activity during stereotyped work and its relation to muscle pain, *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 62(1), 31-41, 1990.

Waersted, M. and Westgaard, R.H., Working hours as a risk factor in the development of musculoskeletal complaints, *Ergonomics*, 34(3), 265-276, 1991.

Westgaard, R.H., Waersted, M., Jansen, T. and Aaras, A., Muscle load and illness associated with constrained body postures, *Ergonomics of Working Postures*, 5-18, 1986.

Winkel, J., Ekblom E., Hagberg, M. and Jonsson, B., The working environment of cleaners. Evaluation of physical strain in mopping and swabbing as a basis for job redesign. *In Kvålseth TO (ed), Ergonomics of workstation design*, 35-44, 1983a.

Winkel, J., Ekblom, B. and Tillberg, B., "Ergonomic and medical factors in shoulder/arm pain among cabin attendants as a basis for job redesign", *Proceedings of the 8th International Congress of Biomechanics*, 4(A), 567-573, 1983b.

Winkel, J. and Westgaard, R., Occupational and individual risk factors for shoulder-neck complaints: Part II – The scientific basis (literature review) for the guide, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 10(1-2), 85-104, 1992.

Winkel, J. and Gard, G., An EMG-study of work methods and equipment in crane coupling as a basis for job redesign, *Applied Ergonomics*, 19(3), 178-184, 1988.

Winkle, J., Towards optimizing physical activity in VDT/office work, *Promoting Health and Productivity in the Computerized Office*, 94-117, 1990.

Author listings

Yong-Ku Kong: ykong@skku.edu
Highest degree: PhD, Industrial Engineering, The Pennsylvania state University.
Position title: Professor, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Physical ergonomics, WMSDs, Occupational safety and health, Ergonomics design

Hyun-Ho Shim: shim2906@naver.com
Highest degree: M.S., Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Position title: PhD Student, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: WMSDs, Analysis of Work Loads, EMG, Motion Capture

Seungjae Son: jamesdrummer@naver.com
Highest degree: B.S., Department of Industrial and Management Engineering, Kyungsung University

Position title: M.S., Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Physical ergonomics, Ergonomics design, Workplace ergonomics

Donghyun Park: dhpark@inha.ac.kr
Highest degree: PhD, Industrial Engineering, The Pennsylvania state University.
Position title: Professor, Department of Industrial Engineering, Inha University
Areas of interest: Physical ergonomics, WMSDs, Occupational safety and health, Ergonomics design

Hyunji Keum: khz1996@naver.com
Highest degree: M.S., Industrial Design engineering, Korea University of Technology and Education
Position title: PhD Student, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Physical ergonomics, WMSDs, Analysis of Work Loads, Ergonomics design