JESK J Ergon Soc Korea 2025; 44(4): 391-409
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2025.44.4.391
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

A Comparative Study of Muscle Activity Across Different Types of Delivery Vehicles Based on EMG System and AnyBody Modeling System (AMS) Analysis

Yong-Ku Kong[1], Hyun-Ho Shim[1], Seungjae Son[1], Suk Lee[2], Soon-Kyo Lee[2], Hyunji Keum[1]

[1]Sungkyunkwan University, Department of Industrial Engineering, Suwon, 16419
[2]Korea Railroad Research Institute, Logistics System Research Department, Gyeonggi-do, 16105

EMG와 AMS를 활용한 택배 차량별 근육 활성도 비교 연구

공용구[1], 심현호[1], 손승재[1], 이석[2], 이순교[2], 금현지[1]

[1]성균관대학교 산업공학과
[2]한국철도기술연구원 첨단물류시스템연구실

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

Received : February 14, 2025
Revised : May 24, 2025
Accepted : July 02, 2025

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

Objective: This study aims to comprehensively evaluate the predictive validity and practical applicability of the AnyBody Modeling System (AMS) by comparing muscle loads during parcel loading tasks across different types of delivery trucks (conventional, low-floor, and newly designed) using both EMG and AMS analyses.

Background: With the growth of the logistics industry and the rise in contactless consumption, the demand for parcel delivery has surged, leading to an increased workload for delivery workers. To mitigate this burden, a newly designed delivery vehicle has been proposed, which needs a quantitative ergonomic evaluation of the newly designed truck's effectiveness in reducing muscle load. While EMG analysis has been widely used for such assessments through experimental studies, simulation-based analysis using the AMS has recently emerged as an alternative method for predicting muscle load without the need for using EMG muscle activity analyses. Despite its potential, further validation is required to determine whether the AMS method can fully replace the conventional EMG analysis method.

Method: Twenty healthy male participants with experience in parcel delivery were recruited for this study, and EMG and AMS data from five of them were selected for analysis. Muscle activities of the erector spinae (ES), upper trapezius (UT), vastus lateralis (VL), biceps femoris (BF), tibialis anterior (TA), and lateral gastrocnemius (GASL) were measured using an EMG system. Additionally, the Xsens IMU motion capture system was used to provide posture input data for AMS modeling. Participants performed a loading task, carrying two 5kg boxes. Statistical analysis was conducted using the Kruskal-Wallis test and Dunn's post hoc test.

Results: EMG analysis showed that the erector spinae (ES) and biceps femoris (BF) exhibited the highest muscle activation, while the upper trapezius (UT) showed the lowest, with statistically significant differences among muscle types (p<0.05). Although no significant main effect was found for truck type, muscle activation was generally higher in low-floor trucks. AMS analysis revealed that ES had the highest muscle activation at both the 50th and 90th percentiles, aligning with EMG trends. However,

unlike EMG, AMS estimated the lowest activation in the calf muscles (GASL and TA). Regarding the interaction effects between truck type and muscle type, both EMG and AMS analyses at the 50th percentile showed that the newly designed truck exhibited the lowest activation for ES and BF. Conversely, for UT at the 50th percentile and TA at the 90th percentile, the newly designed truck showed the highest activation, displaying similar trends in both analyses. However, for TA at the 50th percentile, EMG and AMS results exhibited different trends.

Conclusion: This study confirmed that the newly designed truck may help reduce muscle load, particularly in the erector spinae (ES) and biceps femoris (BF), suggesting its potential to alleviate lower back and lower limb muscle strain for delivery workers. Additionally, while EMG and AMS analyses exhibited similar trends for some muscles, discrepancies were observed in others. This indicates that AMS could serve as an alternative method to EMG in specific applications; however, further research is required to enhance its predictive accuracy.

Application: This study suggests that improving delivery truck design can contribute to reducing muscle loads in delivery workers, emphasizing the importance of incorporating ergonomic design factors. Additionally, it highlights the potential applicability of AMS while underscoring the need for further research to improve its predictive accuracy.

Keywords: Muscle activity, Delivery trucks, Electromyography, AnyBody modeling system, Work-Related Musculoskeletal Disorders (WMSDs)

1. Introduction

최근 디지털 및 모바일 기술의 발달과 더불어, 코로나19 팬데믹으로 인한 비대면 소비 확산은 전자상거래 시장의 성장을 촉진하였고, 이에 따라 택배 물류 수요도 급격히 증가하였다. National Logistics Information Center (2021)의 택배 매출액 통계에 따르면, 국내 택배 시장 매출은 전년 대비 14.63% 증가한 것으로 나타났다. 이러한 택배 수요의 증가에 따라 택배기사의 업무량 또한 동반 상승하였으며, 이로 인해 택배 종사자들의 작업 부하는 심각한 사회적 이슈로 부각되고 있다. Jang et al. (2021)에 따르면, 택배기사의 일평균 노동시간은 11.5시간으로, 신체적 부담이 없는 최대 허용 작업시간(Maximum acceptable work time, MAWT)인 8시간을 약 3.5시간 초과하는 것으로 보고되었다. 또한, Kim and Choi (2021)의 조사에 따르면, 택배기사는 하루 평균 약 100개의 배송 물품을 처리하는 것으로 나타났으며, 이와 같은 과중한 작업량과 작업시간은 화물 분류, 배송, 수탁, 집화 등 반복적인 업무로 구성된 택배 작업의 특성과 맞물려 신체적 부담을 가중시키고 있다.

택배 작업 중 반복되는 무릎 굽힘 자세나 허리를 깊이 굽혀 물건을 들어올리는 부적절한 작업 자세는 요통, 어깨 통증, 무릎 및 다리 통증 등 근골격계 질환의 높은 유병률로 이어진다(Woo et al., 2022). 특히, 배송 과정에서 반복적으로 수행되는 계단 오르내리기와 다양한 무게 및 부피의 배송물 상하차 작업은 택배 업무의 대표적인 신체 부담 요소로 작용하며, 이로 인해 허리, 어깨, 하지 부위에 근골격계 질환이 유발될 수 있음이 보고되고 있다(Kim and Choi, 2021). Lee (2019)는 택배기사의 물리적 작업 환경 중 가장 큰 부담 요인으로 중량물 취급(88.3%)을 지적하였고, 이 외에도 장시간 선 자세 유지, 반복적인 허리 굽힘, 쪼그려 앉은 상태에서의 작업 수행 등 부적절한 자세들이 주요 문제로 보고되었다. 이에 따라, 택배 업무의 핵심 문제는 반복적인 중량물 취급과 부적절한 작업 자세에 기인한 근골격계 질환 발생으로 요약될 수 있다(Mbang Bian et al., 2022).

이와 함께, 택배 업무에 사용되는 차량 유형 또한 새로운 작업 리스크 요인으로 부각되고 있다. 2019년 개정된 주택건설기준에 의거하여, 신축 아파트의 지하주차장 출입구 높이가 기존보다 낮아짐에 따라 일반 탑차의 진입이 제한되었고, 이에 대응하기 위해 저상 택배 차량이 도입되었다. 그러나 저상 탑차는 화물칸의 높이가 약 1,270~1,400mm에 불과하여, 작업자가 상하차 작업을 수행할 때 허리 굽힘 자세를 오랜 시간 유지해야 하며, 이로 인한 신체적 부담이 증가하고 있다. 더불어, 낮아진 화물칸 높이로 인해 차량 적재 용량이 줄어드는 문제가 발생하며, 이는 택배기사의 노동 강도 증가 및 경제적 손실로도 이어지고 있다. 따라서 이러한 구조적 문제를 보완할 수 있는 새로운 차량 설계 및 개발의 필요성이 대두되고 있다.

이러한 작업 환경 및 설계 변화에 따른 신체 부담 차이를 보다 정량적으로 파악할 수 있는 분석 기법의 필요성이 제기되고 있으며, 그 중 근전도(Electromyography, EMG) 분석은 다양한 산업 현장에서 인간공학적 평가 방법으로 널리 활용되고 있다. 예를 들어, Kong et al. (2023)은 택배기사의 신체 부하를 분석하기 위해 EMG와 작업 자세, 주관적 불편도를 함께 평가하였으며, Hurley et al. (2012)은 표준형 택배 트럭과 자동 및 전동식 해제 도어를 갖춘 프로토타입 트럭 간의 근활성도 차이를 비교하였다. 또한, Lavender et al. (2023)은 손수레 설계 유형에 따른 근육 부담을 정량적으로 분석하기 위해 EMG를 활용하였다. 이와 같이, EMG 기반 분석은 작업 방식이나 도구 설계에 따른 근육 부하의 차이를 정량화하는 데 효과적인 도구로 자리잡고 있다.

EMG를 통한 신체 부하 평가 외에도, 최근에는 생체역학적 시뮬레이션 분석 도구인 AMS가 근육 활성도 예측을 위해 다양한 연구에 활용되고 있다. AMS는 최근 인체공학 연구 분야에서 시뮬레이션을 사용하는 역동역학 분석 프로그램으로, 신체 가속도와 중력을 기반으로 골격 근육 및 관절에서 발생하는 500개 이상의 부하를 계산할 수 있다(Wagner et al., 2007). EMG는 피부 표면 근육만 측정할 수 있는 단점이 있는 반면, AMS는 피부 표면 근육과 심부 근육을 모두 분석할 수 있는 장점이 있다. 또한 EMG는 각 근육에 대해 최대 자발적 수축 비율(%MVC)로 정규화가 필요한 반면, AMS는 인체 계측 정보를 기반으로 프로그램에서 제공하는 AnyBody Management Model Repository (AMMR)의 더미 템플릿을 통해 각 근육 그룹의 최대 근육 활동 값을 도출하여 정규화를 수행하게 되므로, 각 근육별 정규화 작업이 필요하지 않은 장점이 있다(Damsgaard et al., 2006). 이러한 장점을 바탕으로 AMS는 다양한 작업 환경에서 생체역학적 분석을 위해 단독 활용되기도 하는데, Zhou and Wiggermann (2019)은 체위 변경 작업 시 체중 변화에 따른 요추 부하를, Zhu et al. (2023)은 stair-climbing 휠체어 사용 중 하지 관절의 근역학적 특성을, Reilly and Kontson (2020)은 손목과 손가락의 움직임을 제한한 조건에서 상지 근육군의 근력을 AMS를 통해 정량적으로 분석하였다.

다만, 이러한 AMS는 생체역학적 시뮬레이션을 통해 근육 부하를 예측할 수 있지만, 실측 EMG와 비교했을 때, 실제 근육의 활성화 상태를 정확히 반영하지 못할 수 있으며, 다양한 근육군 간의 미세한 차이를 포착하는 데 한계가 있을 수 있다. 따라서 AMS 모델이 다양한 근육의 활성화 패턴을 정확히 반영하고 있는지, 그리고 실제 생체역학적 데이터를 얼마나 잘 재현할 수 있는지에 대한 검증이 필요하다.

이에 따라, AMS가 실제 EMG 분석을 대체하거나 보완할 수 있는지 여부를 평가하고자 하는 비교 연구들이 수행되고 있다. Wibawa et al. (2013)은 점프 동작을 중심으로 하지 근육의 근활성도를 분석한 결과, 일부 근육군에서 AMS 예측값과 EMG 측정값 간에 차이가 있음을 보고하였다. 이어진 연구인 Wibawa et al. (2016)은 보행 및 점프 동작을 대상으로 주요 하지 근육의 활성도 변화 패턴을 비교한 결과, 특정 동작에서는 AMS와 EMG 간 유사한 경향이 관찰되었다고 밝혔다. Ji et al. (2016)은 벤치프레스 동작 중 그립 너비 변화에 따른 상지 주요 근육의 근활성도를 AMS와 EMG를 통해 분석하여, 시뮬레이션 기반 예측의 타당성을 부분적으로 입증하였다. Fritzsche et al. (2021)은 상지 외골격을 착용한 상태에서 머리 위 작업을 수행하며, 삼각근의 근활성도 및 어깨 관절 반력에 대한 AMS 예측값이 실측 EMG 결과와 유사한 경향을 보였다고 보고하였고, Kong et al. (2022)은 하지 외골격 착용 유무 및 작업 높이에 따른 근육 부하를 EMG와 AMS로 비교하였으며, AMS 분석 결과는 전반적으로 EMG보다 낮은 근활성도 값을 보였으나, 외골격 착용 조건에 따른 근육 활성도의 변화 양상은 두 방법 간 유사하게 나타났다고 보고하였다. 그러나 이러한 기존 연구들은 대부분 단일 동작이나 제한된 작업 조건에 국한되어 수행되었으며, 실험실 환경에서 비교적 통제된 움직임을 분석하는 데 중점을 두었다는 한계가 있다. 특히, 차량 구조와 작업 공간에 따라 반복적으로 발생하는 상차 작업과 같은 산업 현장의 복합적이고 실제적인 작업 조건을 반영한 분석은 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 다양한 택배 차량 유형(일반, 저상, New 탑차)에 따른 상차 작업 시, 실측 기반의 EMG 분석과 시뮬레이션 기반의 AMS 분석을 통해 작업자의 근육 부담을 비교함으로써, AMS의 예측 타당성과 현장 적용 가능성을 종합적으로 검토하고자 한다.

2. Methods

2.1 Participants

본 연구는 근골격계 질환 병력이 없고 택배업 종사 경험이 있는 건강한 성인 남성 20명을 대상으로 실험을 수행하였다. 수집된 Xsens 모션 캡처 데이터와 EMG 신호의 품질을 종합적으로 검토한 결과, 신뢰도 기준을 충족한 5명의 데이터를 최종 분석에 포함하였다. 해

당 피험자들의 인체 계측 정보는 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Anthropometric data of the participants (mean ± standard deviation)

Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)
39.3±9.2	174.2±6.0	76.2±8.8

2.2 Experimental conditions

본 연구는 탑차의 유형에 따른 근육 부하를 비교하기 위해, 택배업에서 일반적으로 사용하는 일반 탑차와 저상 탑차, New 탑차(일반 탑차의 장점을 반영, 저상 탑차의 단점을 보완)의 3가지 차량을 평가하였다.

일반 탑차의 제원은 높이 1,580mm, 길이 2,400mm, 너비 1,670mm로 택배 산업에서 일반적으로 많이 사용되는 화물 트럭의 제원과 유사하였다. 반면, 저상 탑차의 경우, 높이 1,270mm로 일반 탑차의 제원보다 310mm 낮으며, 길이 2,810mm와 너비 1,640mm는 일반 탑차와 유사하게 선정하였다. 본 연구에 사용된 New 탑차는 물류 작업자의 근골격계 부담을 저감하기 위해 한국철도기술연구원에서 새롭게 설계한 차량으로, 화물칸의 최고/최소 높이는 각각 1,682mm와 1,386mm, 너비는 1,860mm, 길이는 3,435mm이다. 본 연구에서 평가한 3종류 탑차들의 제원은 아래 Table 2와 같다.

Table 2. Specifications for three types of delivery trucks

	Conventional truck	Low-floor truck	Newly designed truck
Height from the ground (mm)	700	700	340
Height (mm)	1,580	1,270	1,386~1,682
Length (mm)	2,400	2,810	3,435
Width (mm)	1,670	1,640	1,860

본 연구를 수행하기 위해 3가지 탑차를 설치하고 데이터 수집 및 측정이 가능한 장소로 대학교 야외 주차장을 섭외하여 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 일반 탑차와 저상 탑차 그리고 New 탑차의 목업은 Figure 1과 같이 배치 및 설치하였다.

Figure 1. Experimental set-up for three types of trucks

상차 작업 수행 시 사용할 박스의 무게를 선정하기 위하여 C사 물류센터의 Parcel과 Fresh bag 무게 분포를 분석한 결과, 두 Case 모두 5kg 내외의 무게 분포가 70~90%로 분석되어, 본 실험에서 사용되는 박스의 무게는 5kg로 선정하였다. 취급하는 박스의 크기는 택배로 구매할 수 있는 물품 중 약 5kg에 해당하는 라면 멀티팩 상자(370×300×280mm)를 사용하였다. 또한, 상차 작업 수행 시 탑차 내부에 적재하는 박스의 개수는 피험자의 인터뷰를 기반, 탑차 내부의 양옆으로 박스를 쌓아 올릴 수 있는 최대 개수는 총 48개로 선정하였다.

2.3 Experimental tasks

피험자들은 각 차량별로, 5kg 박스를 2개씩 옮겨 1 cycle 당 4개의 박스를 적재하고 이를 12회 수행하여 총 48개의 박스를 상차하는 작업을 수행하였다. 일반 및 저상 탑차의 경우(Figure 2, Left), 탑차의 바닥 높이가 지면으로부터 700mm이기 때문에, 화물칸 입구에 2박스를 2번(4-박스) 올려놓은 후, 피험자가 탑차 내부로 올라가 올려놓은 4박스를 2박스씩 2번 차량 내부에 적재하였다. 반면, New 탑차의 경우(Figure 2, Right), 탑차 바닥의 높이가 지면으로부터 340mm이므로, 박스를 탑차 바닥 입구에 따로 적재하지 않고, 2박스씩 들어 바로 차량 내부로 진입해 적재하였다.

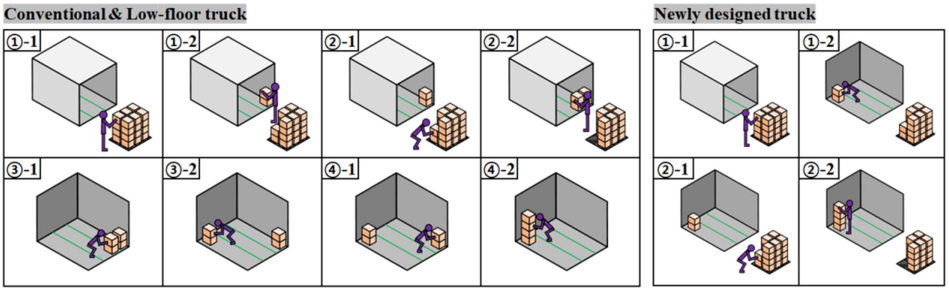

Figure 2. Loading methods by truck type (Left: Conventional & Low-floor truck; Right: Newly designed truck)

2.4 Experimental procedure

실험 절차는 성균관대학교 기관생명윤리위원회(IRB)의 승인을 받았으며, 헬싱키 선언에 따라 수행되었다(approval#: SKKU 2022-10-051). 실험에 앞서 모든 피험자들에게 연구 목적, 절차, 장비, 작업, 잠재적 위험 등에 대해 설명하였다. 피험자들이 서면 동의서를 작성한 후 나이, 체중, 키, 발 길이 등 인구 통계 및 인체 측정 데이터를 수집하였다. 이후 피험자들은 어깨, 허리, 다리에 EMG 센서를 부착하였고, 각 피험자의 근육에 따른 정규화를 수행하기 위해 최대 수의적 수축력(MVC)을 측정하였다. 또한, 피험자들은 3D Motion Capture의 IMU 센서를 착용하였고, 각 센서에 대한 calibration을 수행하였다. 세 가지 차량의 상차 작업 순서는 무작위로 진행되었으며, 데이터 정확성을 위해 작업은 2번에 나눠 진행하였고, 근육 피로를 최소화하기 위해 차량별 상차 작업 사이에 5분간의 휴식 시간을 제공하였다.

2.5 Apparatus and measurements

2.5.1 Electromyography (EMG)

근육의 부하를 정량적으로 평가하기 위해 근전도 시스템(Delsys, Trigno Avanti Sensor, USA)을 사용하였다(Figure 3, Left). 측정 대상 근육은 척추기립근(ES), 상부승모근(UT), 외측광근(VL), 대퇴이두근(BF), 전경골근(TA), 외비복근(GASL)으로, 어깨, 허리, 하지를 포함한 총 6개 근육에 전극을 부착하였다. 전극 부착 위치는 피험자의 주력 손 기준으로 SENIAM 가이드라인(Hermens et al., 1999)에 근거하여 부착하였다(Figure 3, Right). 근육별 정규화를 위해 MVC를 측정하였으며(Hermens et al., 1999; Smith et al., 2004; Szpala et al., 2011; Siddiqi et al., 2015; Bussey et al., 2018), EMG 데이터는 1,500Hz로 수집하였고, band pass filter (20~400Hz)로 6th order Butterworth filter를 수

행한 뒤, RMS (root-mean square: 50ms)를 사용하여 smoothing을 수행하였다.

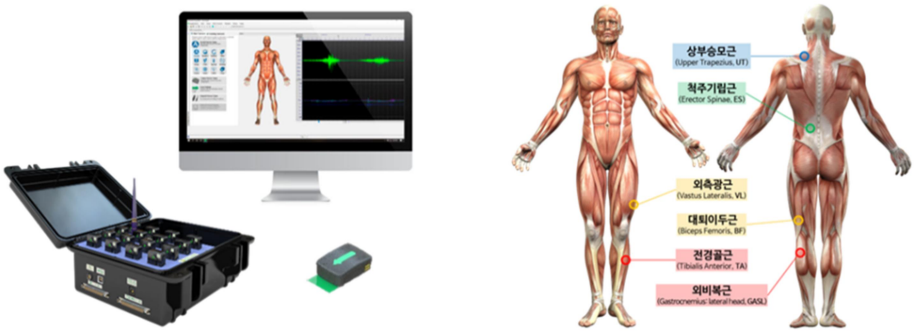

Figure 3. EMG measurement system (Left) and locations of EMG sensor attachment (Right)

2.5.2 Motion capture (Xsens - MVN Awinda)

AMS 해석을 위한 입력 자세 데이터를 수집하기 위해, 본 연구에서는 MVN Awinda 시스템(Xsens Technology B.V., Enschede, Netherlands)의 관성 측정 장치(Inertial Measurement Unit, IMU)를 사용하였다(Figure 4, Left). 동작 데이터는 60Hz의 샘플링 주기로 수집되었으며, Xsens 지침에 따라 총 17개의 IMU 센서를 머리(1개), 흉골(1개), 골반(1개), 어깨(2개), 상완(2개), 전완(2개), 손(2개), 허벅지(2개), 종아리(2개), 발(2개)에 부착하였다(Figure 4, Right). 수집된 데이터는 Joint Angles, Segment Position, Segment Velocity, Segment Acceleration, Segment Angular Velocity, Center of mass 등의 생체역학적 정보를 포함하며, 해당 데이터는 AMS 모델의 입력값으로 사용되어, 시뮬레이션 기반 근골격계 분석의 기초 자료로 활용되었다. 본 연구에서는 Xsens 데이터를 독립적인 분석 대상으로 활용하지 않고, AMS 시뮬레이션 수행을 위한 입력 자세 정보 수집용으로 사용하였다.

Figure 4. IMU motion capture system - MVN Awinda (Left) and locations of IMU sensor attachments (Right)

2.5.3 The AnyBody Modeling System (AMS)

근육 부하를 시뮬레이션으로 예측 분석하기 위해 AnyBody Modeling System (AMS; AnyBody Technology A/S, Aalborg, Denmark)을 활용하였다. AMS는 컴퓨터 기반의 근골격계 시뮬레이션 소프트웨어로, 해부학적 인체 모델과 역동역학(Inverse dynamics) 해석, 그리고 근육 동원 최적화 알고리즘을 결합하여, 신체의 관절 운동 정보와 외부 하중 데이터를 바탕으로 근육 활성도, 관절 반발력, 내부 부하 등의 생체역학적 파라미터를 정량적으로 예측할 수 있다(Damsgaard et al., 2006; Wagner et al., 2007; Jeong, 2012).

AMS는 Figure 5와 같이 세 가지 영역(Code, Chart, Model)으로 구성된다. Code는 AnyScript 언어를 통해 시뮬레이션 모델 구성에 필요한 신체 계측 정보, 외부 하중 데이터 등을 결합하고, 시뮬레이션의 수정 및 분석 조건을 설정하는 공간이다. Chart는 시계열 기반으로 근육 활성도, 관절 토크 등의 생체역학 데이터를 시각적으로 제공하며, Model은 모든 신체 분절이 포함된 인체 모델의 동작을 3D로 확인할 수 있게 한다.

본 연구에서는 AMS 모델의 구성을 AnyBody Managed Model Repository (AMMR)의 전신 모델을 기반으로 하였으며, 피험자의 신체 계측 정보에 맞게 인체 모델을 수정하였다. 최대 근활성도는 AMMR 템플릿을 기반으로 자동 정규화되었으며, 택배 작업에서 발생하는 외부 힘은 CAD로 모델링한 택배 상자를 AMS 환경에 연동하여 입력하였다. 동작 데이터는 Xsens IMU 시스템을 통해 수집된 관절 자세 및 세그먼트 정보(60Hz)를 기반으로 입력되었으며, 이를 통해 상차 작업 중의 주요 근육 활성도를 예측하였다.

EMG는 생리학적 신호를 기반으로 한 실측 방식이며, AMS는 수학적 알고리즘 기반의 예측 방식으로, 두 분석법은 데이터 생성 방식과 분석 접근 방식에 있어 본질적인 차이가 존재한다. AMS는 EMG처럼 생리학적 신호의 직접 측정은 아니며, 근육 활성도를 포함한 생체역학적 변수들을 해부학적 모델, 관절 운동 정보, 외부 하중을 바탕으로 수치해석을 통해 예측하는 시스템이다. 본 연구에서는 이러한 차이를 인지하고, 기존 선행연구들(Wibawa et al., 2013; Wibawa et al., 2016; Kong et al., 2022; Gautam et al., 2024)과 마찬가지로 실측 데이터(EMG)와 시뮬레이션 예측값(AMS)을 비교함으로써 AMS의 예측 타당성을 간접적으로 검증하고자 하였다. 특히 두 분석법의 절대값 비교보다는, 근육별 활성도의 변화 양상이 실제 측정값(EMG)과 얼마나 일치하거나 유사한 경향을 보이는지를 분석하였으며, 이를 통해 AMS의 예측 타당성과 실무적 활용 가능성을 검토하였다.

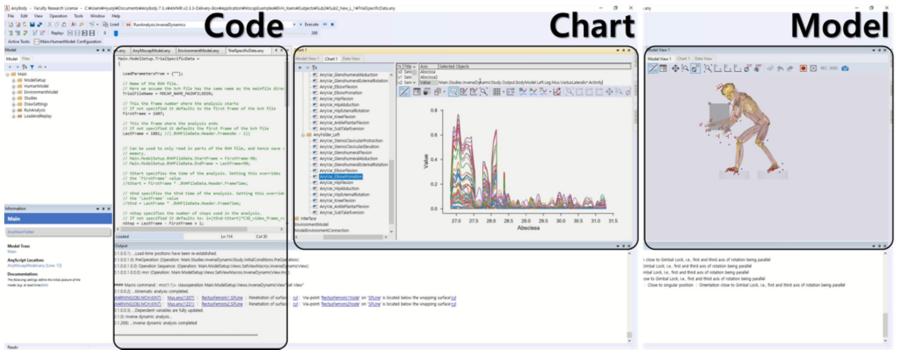

Figure 5. The composition of the AnyBody Modeling System (AMS) screen

2.6 Statistical analysis

본 연구에서는 택배 차량의 종류에 따라 근활성도 정량화 분석과 함께 시뮬레이션 데이터 분석과의 비교를 위한 통계적 유의성을 검증하였다. 독립변수는 Car Type과 Muscle Type으로 설정하였으며, 종속변수로는 근육 활동(근전도 시스템에서 측정된 근육 활성도인 EMG 데이터와 AMS 시뮬레이션을 통해 추정된 근육 활동 데이터)으로 설정하였다.

Car Type과 Muscle Type에 따른 근활성도의 통계학적 유의성을 검증하기 위해 SPSS 20 (SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 사용하였으며, 유의수준은 0.05로 설정하였다. 분석에 앞서 Shapiro-Wilk test와 Kolmogorov-Smirnov 검정을 통해 정규성을 확인한 결과, 대부분의 변수에서 정규성이 확보되지 않아 Kruskal-Wallis 비모수 검정을 적용하였으며, 유의한 차이가 나타난 변수에 대해서는 Dunn's test로 사후 분석을 수행하였다.

3. Results

3.1 Experimental muscle activity (EMG measurement data)

EMG 분석 결과, Muscle Type에 대한 주효과는 모두 통계적으로 유의하게 나타났다(p<0.05). 50%ile EMG 데이터에서는 허리 근육인 척추기립근(ES, 30.88%MVC)이 가장 높은 근활성도를 보였으며, 그 뒤로 대퇴이두근(BF, 23.42%MVC), 장딴지근(GASL, 20.33%MVC), 외측광근(VL, 20.22%MVC), 전경골근(TA, 19.33%MVC) 순으로 나타났다. 반면, 어깨 근육인 상부승모근(UT, 6.47%MVC)은 가장 낮은 근활성도를 보였다. 사후분석 결과, ES와 UT는 다른 모든 근육들과 유의한 차이를 보였으며(p<0.05), 반면 VL, BF, TA, GASL 간에는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Figure 6, Left; Table 3).

한편, 90%ile EMG 데이터에서는 BF (53.12%MVC)가 가장 높은 근활성도를 보였고, ES (49.30%MVC), GASL (46.41%MVC), VL (44.80%MVC), TA (41.58%MVC) 순으로 나타났다. UT (17.67%MVC)는 50%ile과 마찬가지로 가장 낮은 근활성도를 보였으며, 사후분석 결과 UT는 모든 근육과 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다(p<0.05). 이와 더불어, TA-ES, BF-VL, TA-GASL 간에도 유의한 차이가 확인되었다.

Car Type에 따른 주효과는 통계적으로 유의하지 않았으나, 일반적으로 50%ile에서는 저상 탑차가 New 탑차 및 일반 탑차보다 약 5.90~9.31% 높은 근활성도를 보였으며, 90%ile에서도 역시 약 2.92~8.09% 높은 근활성도를 보였다(Figure 6, Right).

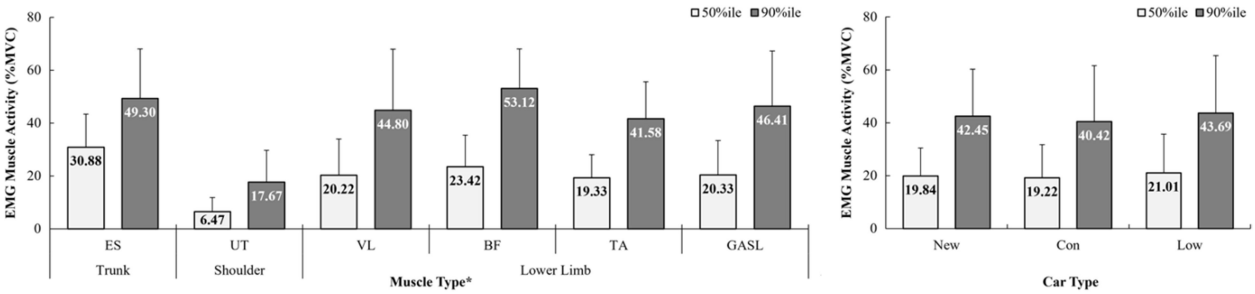

Figure 6. The main effect of Muscle Type (Left), and Car Type (Right) on experimental muscle activity. Abbreviations: New = Newly designed truck; Con = Conventional truck; Low = Low-floor truck

Table 3. Pairwise comparison using Dunn's test on muscle type groups of experimental muscle activity (Left: 50%ile; Right: 90%ile)

Pairwise comparison of groups (50%ile)						Pairwise comparison of groups (90%ile)					
Sample 1-Sample 2	Test statistic	Std. error	Std. test statistic	Sig.	Adj. Sig.	Sample 1-Sample 2	Test statistic	Std. error	Std. test statistic	Sig.	Adj. Sig.
UT-VL	-345.360	32.419	-10.653	0.000	0.000***	UT-TA	-355.257	32.419	-10.958	0.000	0.000***
UT-GASL	-355.286	32.419	-10.959	0.000	0.000***	UT-VL	-371.240	32.419	-11.451	0.000	0.000***
UT-TA	-361.740	32.419	-11.158	0.000	0.000***	UT-GASL	-417.229	32.419	-12.870	0.000	0.000***
UT-BF	-440.497	32.419	-13.588	0.000	0.000***	UT-ES	456.109	32.419	14.069	0.000	0.000***
UT-ES	589.351	32.419	18.179	0.000	0.000***	UT-BF	-525.006	32.419	-16.194	0.000	0.000***
VL-GASL	-9.926	32.419	-0.306	0.759	1.000	TA-VL	15.983	32.419	0.493	0.622	1.000
VL-TA	-16.380	32.419	-0.505	0.613	1.000	TA-GASL	-61.971	32.419	-1.912	0.056	0.839
VL-BF	-95.137	32.419	-2.935	0.003	0.050	TA-ES	100.851	32.419	3.111	0.002	0.028*

Table 3. Pairwise comparison using Dunn's test on muscle type groups of experimental muscle activity (Left: 50%ile; Right: 90%ile) (Continued)

Pairwise comparison of groups (50%ile)						Pairwise comparison of groups (90%ile)					
Sample 1-Sample 2	Test statistic	Std. error	Std. test statistic	Sig.	Adj. Sig.	Sample 1-Sample 2	Test statistic	Std. error	Std. test statistic	Sig.	Adj. Sig.
VL-ES	243.991	32.419	7.526	0.000	0.000***	TA-BF	169.749	32.419	5.236	0.000	0.000***
GASL-TA	6.454	32.419	0.199	0.842	1.000	VL-GASL	-45.989	32.419	-1.419	0.156	1.000
GASL-BF	85.211	32.419	2.628	0.009	0.129	VL-ES	84.869	32.419	2.618	0.009	0.133
GASL-ES	234.066	32.419	7.220	0.000	0.000***	VL-BF	-153.766	32.419	-4.743	0.000	0.000***
TA-BF	78.757	32.419	2.429	0.015	0.227	GASL-ES	38.880	32.419	1.199	0.230	1.000
TA-ES	227.611	32.419	7.021	0.000	0.000***	GASL-BF	107.777	32.419	3.324	0.001	0.013*
BF-ES	148.854	32.419	4.592	0.000	0.000***	ES-BF	-68.897	32.419	-2.125	0.034	0.504

p-values were adjusted using the Bonferroni correction method. Significance levels: *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001 (two-tailed)

Car Type과 Muscle Type 간의 교호작용은 상부승모근(UT)의 50%ile 및 90%ile, 대퇴이두근(BF)의 90%ile, 전경골근(TA)의 90%ile에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Figure 7). 상부승모근(UT)의 경우, 50%ile 및 90%ile 모두에서 일반 탑차는 저상 탑차 및 New 탑차보다 각각 38.83~42.14%, 39.82~45.99% 낮은 근활성도를 보였다. 반면, TA의 90%ile에서는 저상 탑차가 일반 탑차 및 New 탑차보다 약 4.38~15.88% 낮은 근활성도를 나타냈다.

Muscle Type에 따른 EMG 분석 결과에서 언급한 바와 같이, 택배 상차 작업 중 근활성도가 가장 높았던 척추기립근(ES)과 대퇴이두근(BF)의 경우, BF의 90%ile에서 New 탑차(45.28%MVC)는 저상 탑차(55.78%MVC)보다 약 18.82% 유의하게 낮은 근활성도를 보였다 (p<0.05). 또한 50%ile에서는 비록 통계적으로 유의하지는 않았으나, New 탑차(20.47%MVC)는 일반 탑차(21.69%MVC) 및 저상 탑차

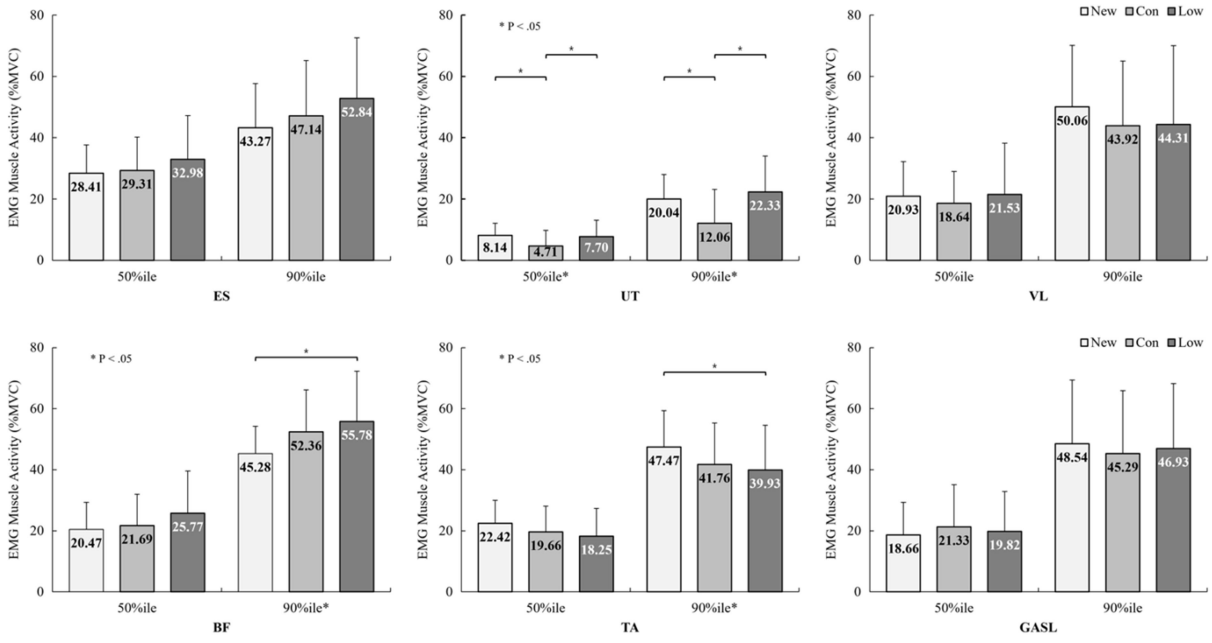

Figure 7. The interaction effect of Car Type and Muscle Type on experimental muscle activity

(25.77%MVC)보다 각각 5.62~20.57% 낮은 근활성도를 나타냈다.

척추기립근(ES) 역시 유사한 경향을 보였으며, 50%ile 및 90%ile 모두에서 New 탑차(28.41%, 43.27%MVC)는 일반 탑차(29.31%, 47.14%MVC) 및 저상 탑차(32.98%, 52.84%MVC)보다 각각 3.07~8.21% & 13.86~18.11% 낮은 근활성도를 보였다(Figure 7).

3.2 Simulation muscle activity (AMS Simulation data)

AMS 분석 결과, Muscle Type에 대한 주효과는 모두 통계적으로 유의하게 나타났다(p<0.05). 50%ile AMS 데이터에서는 EMG 결과와 유사하게 허리 근육인 척추기립근(ES, 13.42%MVC)이 가장 높은 근활성도를 보였다(Figure 8, Left). 그 뒤로는 상부승모근(UT, 4.51%MVC), 대퇴이두근(BF, 3.13%MVC), 외측광근(VL, 2.06%MVC) 순으로 나타났으며, 종아리 근육인 장딴지근(GASL, 0.70%MVC)과 전경골근(TA, 0.43%MVC)은 가장 낮은 근활성도를 보였다. 이는 EMG 결과와는 다소 다른 양상이다. 사후분석 결과(Table 4), UT와 ES 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 그 외 모든 근육 쌍에서는 유의한 차이가 나타났다(p<0.05).

90%ile AMS 데이터에서도 ES (31.37%MVC)가 가장 높은 근활성도를 보였으며, BF (14.12%MVC), VL (12.14%MVC), UT (11.38%MVC) 순으로 높은 활동을 나타냈다. 가장 낮은 근활성도는 50%ile과 마찬가지로 GASL (8.62%MVC)과 TA (4.73%MVC)에서 나타났다(Figure 8, Left). 사후분석 결과(Table 4), TA-GASL 및 BF-UT 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 그 외 모든 근육 간에는 유의한 차이가 나타났다(p<0.05).

Car Type에 따른 주효과는 90%ile에서 통계적으로 유의하게 나타났으며, New 탑차(17.83%MVC)는 일반 탑차(13.29%MVC) 및 저상 탑차(13.27%MVC)보다 각각 34.16%, 34.36% 높은 근활성도를 보였다. 한편, 50%ile에서는 통계적으로 유의하지는 않았으나, 저상 탑차(4.47%MVC)가 New 탑차(3.28%MVC) 및 일반 탑차(3.72%MVC)보다 각각 36.28%, 20.16% 높은 근활성도를 나타냈다. 이때 New 탑차는 일반 탑차보다도 약 11.83% 낮은 근활성도를 보여, 세 종류의 차량 중 허리 근육의 평균 근활성도가 가장 낮은 것으로 나타났다(Figure 8, Right).

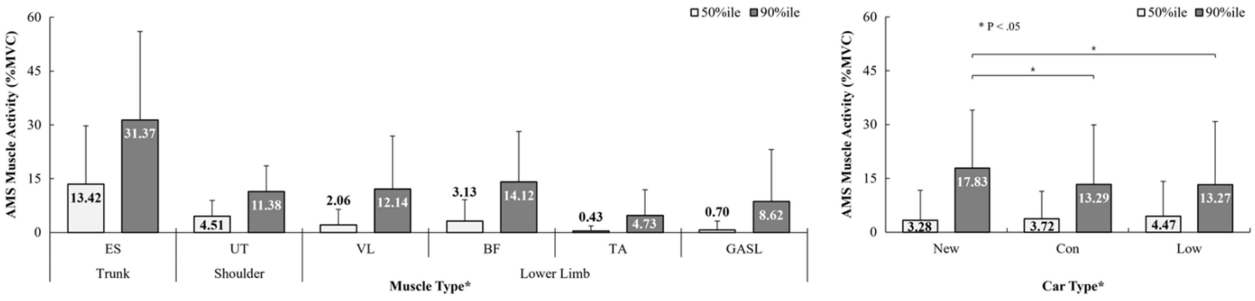

Figure 8. The main effect of Muscle Type (Left), and Car Type (Right) on simulated muscle activity

Table 4. Pairwise comparison using Dunn's test on muscle type groups of simulated muscle activity (Left: 50%ile; Right: 90%ile)

Pairwise comparison of groups (50%ile)						Pairwise comparison of groups (90%ile)					
Sample 1-Sample 2	Test statistic	Std. error	Std. test statistic	Sig.	Adj. Sig.	Sample 1-Sample 2	Test statistic	Std. error	Std. test statistic	Sig.	Adj. Sig.
GASL-TA	188.713	36.587	5.158	0.000	0.000***	TA-GASL	-20.081	36.592	-0.549	0.583	1.000
GASL-VL	307.359	36.587	8.401	0.000	0.000***	TA-VL	223.570	36.592	6.110	0.000	0.000***
GASL-BF	451.596	36.587	12.343	0.000	0.000***	TA-BF	332.267	36.592	9.080	0.000	0.000***

Table 4. Pairwise comparison using Dunn's test on muscle type groups of simulated muscle activity (Left: 50%ile; Right: 90%ile) (Continued)

Pairwise comparison of groups (50%ile)						Pairwise comparison of groups (90%ile)					
Sample 1-Sample 2	Test statistic	Std. error	Std. test statistic	Sig.	Adj. Sig.	Sample 1-Sample 2	Test statistic	Std. error	Std. test statistic	Sig.	Adj. Sig.
GASL-UT	588.906	36.587	16.096	0.000	0.000***	TA-UT	340.139	36.592	9.295	0.000	0.000***
GASL-ES	597.596	36.587	16.334	0.000	0.000***	TA-ES	560.321	36.592	15.313	0.000	0.000***
TA-VL	118.646	36.587	3.243	0.001	0.018*	GASL-VL	203.489	36.592	5.561	0.000	0.000***
TA-BF	262.883	36.587	7.185	0.000	0.000***	GASL-BF	312.186	36.592	8.531	0.000	0.000***
TA-UT	400.193	36.587	10.938	0.000	0.000***	GASL-UT	320.058	36.592	8.747	0.000	0.000***
TA-ES	408.883	36.587	11.176	0.000	0.000***	GASL-ES	540.240	36.592	14.764	0.000	0.000***
VL-BF	-144.238	36.587	-3.942	0.000	0.001***	VL-BF	-108.697	36.592	-2.970	0.003	0.045*
VL-UT	281.547	36.587	7.695	0.000	0.000***	VL-UT	116.570	36.592	3.186	0.001	0.022*
VL-ES	290.238	36.587	7.933	0.000	0.000***	VL-ES	336.751	36.592	9.203	0.000	0.000***
BF-UT	137.309	36.587	3.753	0.000	0.003**	BF-UT	7.872	36.592	0.215	0.830	1.000
BF-ES	146.000	36.587	3.990	0.000	0.001***	BF-ES	228.054	36.592	6.232	0.000	0.000***
UT-ES	8.691	36.587	0.238	0.812	1.000	UT-ES	220.182	36.592	6.017	0.000	0.000***

p-values were adjusted using the Bonferroni correction method. Significance levels: *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001 (two-tailed)

Car Type과 Muscle Type 간의 교호작용은 척추기립근(ES)의 90%ile, 상부승모근(UT)의 90%ile, 외측광근(VL)의 90%ile, 대퇴이두근(BF)의 50%ile, 전경골근(TA)의 90%ile에서 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다(p<0.05). EMG 결과와 유사하게, UT의 90%ile에서는 일반

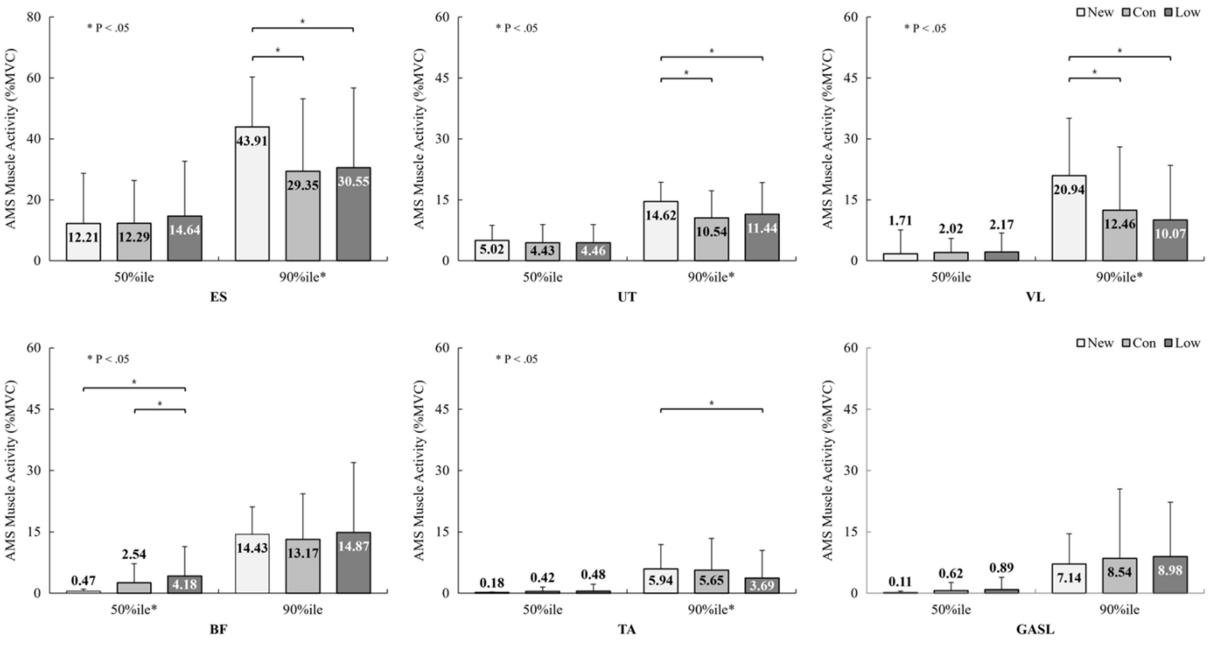

Figure 9. The interaction effect of Car Type and Muscle Type on simulated muscle activity

탑차가 저상 탑차 및 New 탑차에 비해 7.87%에서 최대 27.91%까지 낮은 근활성도를 보였으며, TA의 90%ile 및 VL의 90%ile에서는 일반 및 저상 탑차가 New 탑차에 비해 각각 4.88~37.88%, 40.50~51.91% 낮은 근활성도를 나타냈다.

3.1절에서 보여준 바와 같이, 택배 상차 작업에서 가장 근활성도가 높은 척추기립근(ES)과 대퇴이두근(BF)의 결과 또한 EMG 데이터 분석 결과와 유사한 경향을 보였다. 대퇴이두근(BF)의 50%ile에서는 New 탑차(0.47%MVC)와 일반 탑차(2.54%MVC)가 저상 탑차(4.18%MVC)보다 각각 88.76%, 39.23% 유의하게 낮은 근활성도를 보였고, 90%ile에서도 비록 통계적으로 유의하지는 않았으나, New 탑차(14.43%MVC)와 일반 탑차(13.17%MVC)는 저상 탑차(14.87%MVC)보다 상대적으로 낮은 근활성도를 나타냈다.

척추기립근(ES)의 50%ile 분석에서도 EMG 결과와 유사한 경향이 나타났으며, 비록 통계적으로 유의하지는 않았으나, New 탑차(12.21%MVC)는 일반 탑차(12.29%MVC) 및 저상 탑차(14.64%MVC)보다 상대적으로 낮은 근활성도를 보였다. 반면, 90%ile 분석에서는 New 탑차(43.91%MVC)가 일반 탑차(29.35%MVC) 및 저상 탑차(30.55%MVC)보다 각각 49.61%, 43.73% 통계적으로 유의하게 높은 근활성도를 보였다(Figure 9).

4. Discussion

4.1 EMG vs. AMS: Trend-Based comparison

본 연구에서는 EMG와 AMS를 활용하여 택배 상차 작업 중 차량 유형에 따른 근육 활성도를 비교하고, 두 분석 방법 간의 경향성 일치 여부를 검토하였다. 일부 근육에서는 유사한 활성도 변화 경향이 확인되었으나, 특정 근육군에서는 분석 결과가 상이한 양상을 보였다.

AMS 분석은 Xsens 기반의 자세 및 관절 운동 데이터를 입력값으로 활용하여 수행되었으며, 이는 실제 작업 상황을 반영한 생체역학적 시뮬레이션을 가능하게 하였다. 특히, Xsens 기반의 AMS 시뮬레이션 결과는 일부 주요 근육에서 EMG 측정값과 유사한 경향을 보여, 현장 적용 가능한 정량적 예측 도구로서의 가능성을 제시하였다.

EMG와 AMS의 주효과 결과, 근육 유형 중 척추기립근(ES)과 대퇴이두근(BF)은 높은 근활성도를 보이며 다른 근육에 비해 대체적으로 활성도가 높았는데, 이러한 경향은 해당 두 근육이 중량물을 들고 화물칸을 오르내리는 택배 상차 작업 시 6가지 근육 중에서 가장 기여도가 높은 근육이라는 것을 시사한다. 또한, 차량 유형별(50%ile) 분석 결과, 저상 탑차에서 EMG와 AMS 모두 가장 높은 근활성도를 보였으며, 이는 화물칸의 높이가 낮을수록 근골격계 부담이 커질 수 있음을 의미한다. 따라서, 저상 탑차를 사용할 경우 근골격계 질환 발생 위험이 증가할 가능성이 있음을 시사한다.

EMG와 AMS의 교호작용 결과, 척추기립근(ES)과 대퇴이두근(BF)의 50%ile에서 New 탑차의 활성도가 가장 낮고, 저상 탑차의 활성도가 가장 높은 유사한 경향을 보였다. 이는 실험적 측정값(EMG)과 시뮬레이션 예측값(AMS) 모두에서, New 탑차가 허리 및 하지 부위의 근육 부담을 감소시키는 효과가 있음을 나타낸다. 결과는 다소 상이하지만, EMG에서 가장 낮은 활성도를 보인 상부승모근(UT)의 50%ile과 AMS에서 가장 낮은 활성도를 보인 전경골근(TA)의 90%ile에서도 New 탑차가 다른 탑차보다 상대적으로 높은 근활성도를 보이며 유사한 경향을 나타냈다.

본 연구의 결과와 유사하게, Wibawa et al. (2016)의 정상 보행 및 점프 동작을 분석한 연구에서 EMG와 AMS 간 비교적 높은 일치도를 보였으며, one-legged forward hopping과 side jumping 동작에서 특히 높은 일치도를 나타냈다. 또한, Kong et al. (2022)의 연구에서는 하지 외골격의 근육 부하 감소 효과를 평가하기 위해 EMG와 AMS를 비교한 결과, 특정 하지 근육군에서 두 방법이 유사한 패턴을 보였다. 이러한 연구들은 AMS가 특정 작업 환경에서는 EMG 없이도 근육 활성도를 정량적으로 예측할 가능성이 있음을 시사한다. 또한, Gautam et al. (2024)의 연구에서는 상지 움직임을 분석한 결과, AMS가 OpenSim보다 실제 EMG 데이터와 더 높은 일치도를 보였음을 보고하였다. 특히, AMS는 OpenSim보다 더 많은 근육군을 포함하여 근력 예측을 수행하며, 기존 문헌에서 보고된 근육 활성 패턴과의 높은 일치도를 보였다. 이는 AMS가 특정 조건에서 신뢰할 수 있는 예측 도구로 활용될 가능성이 있으며, 본 연구의 택배 상차 작업과 같은 동적 움직임 분석에도 적용될 수 있음을 의미한다.

반면, EMG와 AMS 비교 결과 일부 차이가 나타났다. 주효과 분석에서 EMG는 상부승모근(UT)의 근활성도가 가장 낮은 반면, AMS에서 외비복근(GASL)과 전경골근(TA)이 가장 낮은 근활성도를 보였다. 또한, 차량 유형별(90%ile) 분석에서 EMG는 저상 탑차의 활성도가 가장 높았던 반면, AMS에서는 New 탑차에서 가장 높은 활성도를 보이며 상이한 결과를 나타냈다. 교호작용 분석에서도 차이가 확인되었는데, 전경골근(TA)의 50%ile에서는 EMG에서 New 탑차가 근활성도가 가장 높고, 저상 탑차에서 가장 낮았던 반면, AMS에서는 New 탑차에서 가장 낮고, 저상 탑차에서 가장 높은 근활성도를 보이며 정반대의 경향이 관찰되었다.

이러한 차이는 EMG가 표면 근육 활성도를 분석하는 반면, AMS는 심부 근육까지 포함하여 분석하기 때문인 것으로 판단된다. Wibawa et al. (2016)의 연구에서도 Normal Walking 시 특정 근육(비복근을 제외한 나머지 하지 근육)에서 EMG와 AMS 간 차이가 나타났으며, Wibawa et al. (2013)과 Wibawa et al. (2016)은 이러한 차이의 원인으로 AMS가 신체 개별 특성을 반영하지 못하고, 모델링 과정에서 일부 단순화가 이루어졌기 때문이라고 설명하였다.

본 연구에서 확인된 EMG와 AMS 간의 불일치 현상은 단순한 분석 기법 간 차이 외에도 실험 환경 및 작업 조건의 영향에서 기인할 수 있다. 예를 들어, New 탑차의 작업 방식에서는 중량물을 들고 화물칸으로 바로 진입하는 형태가 많아 발목과 하지 안정성이 중요한 요소가 되며, 이는 실시간 동작에서의 균형 요구 증가로 이어질 수 있다. 이러한 상황은 전경골근(TA)처럼 자세 안정성에 민감하게 반응하는 근육에서 EMG의 활성도를 높이는 반면, AMS에서는 입력 기반의 예측이 이 변화를 충분히 반영하지 못했을 수 있다. 또한, EMG는 특정 위치에 부착된 전극의 국소적 반응을 포착하는 반면, AMS는 해당 근육군 전체의 평균적 활동을 계산하므로, 동적 부하 변화에 대한 민감도가 상이할 수 있다. 따라서 이러한 분석 단위 및 감도 차이가, 특히 보행 중 자세 변화가 많은 상황에서 상이한 결과를 유발했을 가능성이 있다고 사료된다.

또한, Kong et al. (2022)에서 보고된 바와 같이, 일반적으로 AMS 분석에서 근육 활성도는 EMG보다 낮게 나타나는 경향이 있으며, 이는 AMS가 근육군 내 모든 근육 파트를 분석하기 때문인 것으로 보인다. 예를 들어, 척추기립근(ES)을 분석할 경우, 실제 EMG는 특정 부위에 부착된 전극을 통해 측정하지만, AMS는 ES에 속하는 17개 파트(T1-L1, T2-L2, T3-L3, T4-L4, T5-L5, T6-S1, T7-S2, T8-S3, T9-S4, T10-Sacrum, T11-Sacrum, T12-Sacrum, L1-Sacrum, L2-Sacrum, L3-Sacrum, L4-Sacrum, L5-Ilium)에 대한 근활성도를 모두 고려하여, EMG가 부착된 위치보다 넓은 범위의 근육군에 대한 분석값이 도출하기 때문에, AMS 예측값은 실측 EMG 보다 낮게 산출될 가능성이 있다.

4.2 Comparison of muscle activity

4.2.1 EMG

본 연구에서 수행한 EMG 분석 결과, 상부승모근(UT)의 90%ile, 그리고 대퇴이두근(BF)의 90%ile에서 저상 탑차는 일반 및 New 탑차 대비 유의미하게 높은 근육 활성도를 보였다. 반면, 상부승모근(UT)의 50%ile과 전경골근(TA)의 90%ile에서는 New 탑차가 일반 및 저상 탑차 대비 유의미하게 높은 근활성도를 보였다. 통계적으로 유의하진 않았지만, 외측광근(VL)의 90%ile, 전경골근(TA)의 50%ile, 외비복근(GASL)의 90%ile을 제외한 모든 근육에서 New 탑차는 일반 또는 저상 탑차보다 낮은 근활성도를 보였다.

평균적으로는(50%ile), New 탑차가 일반 또는 저상 탑차보다 ES, VL, BF, GASL 즉 상차 작업의 주요 근육 부하 신체 부위인 허리(ES: 30.88%MVC)와 허벅지(BF: 23.42%MVC), 종아리 뒷부분 근육(GASL: 20.33%MVC)에서 약 2.80~20.55%[척추기립근(ES): 3.06~13.84%, 외측광근(VL): 2.80%(저상탑차), 대퇴이두근(BF): 5.63~20.55%, 외비복근(GASL): 5.83~12.50%] 낮은 근활성도를 보인 반면, 외비복근(GASL)의 길항근의 역할을 하는 전경골근(TA) 근육에서는 14.04~22.85% 높은 근활성도를 보였다.

최대값에 가까운 EMG 데이터의 90%ile에서도, 상차 작업 시 작업 부하가 가장 큰 허리와 허벅지 근육인 척추기립근(ES)과 대퇴이두근(BF)의 분석 결과 또한, New 탑차가 일반 또는 저상 탑차보다 약 8.20~18.83%[척추기립근(ES): 8.20~18.10%, 대퇴이두근(BF): 13.53~18.83%] 낮은 근활성도를 보인 반면, VL, TA, GASL 즉 허벅지 앞부분과 종아리 근육에서 약 3.43~18.88%[외측광근(VL): 12.99~13.99%, 전경골근(TA): 13.67~18.88%, 외비복근(GASL): 3.43~7.16%] 높은 근활성도를 보였다.

이러한 근활성도(EMG) 분석 결과를 통해, New 탑차는 여러 근육에서 일반 탑차와 저상 탑차보다 상차 작업에 있어서의 주요 근육들

인 척추기립근(ES), 대퇴이두근(BF), 그리고 외비복근(GASL)들의 근활성도 즉 근육 부하가 상대적으로 낮아, 작업자의 작업 부담 완화에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 50%ile 기준, New 탑차는 허리, 허벅지와 종아리 뒷부분 근육에서 일반 및 저상 탑차보다 근활성도가 낮았는데, 허리 근육인 ES는 일반 탑차 대비 3.06%, 저상 탑차 대비 13.84% 낮아, New 탑차가 허리 부담을 줄이는데 효과적일 수 있음을 시사한다. 또한, 허벅지 근육(VL, BF)과 종아리 뒷부분 근육(GASL)에서도 근활성도 감소가 관찰되어, 하지 근육 부담이 상대적으로 적은 경향을 보였다. 90%ile 기준, New 탑차는 허리, 허벅지 뒷부분 근육에서 가장 낮은 근활성도를 보였는데, 특히, 허리(ES)와 허벅지 뒷부분(BF) 근육에서 저상 탑차 대비 18.10~18.83% 감소하여, 허리와 허벅지 뒷부분 부담을 효과적으로 경감할 수 있음을 시사한다.

이러한 결과는, 개선된 New 탑차의 화물칸 높이가 작업자의 작업 자세를 보다 직립 상태로 유지하게 함으로써 척추기립근(ES)의 부담을 감소시켰다고 해석할 수 있다. 이는 기존 연구(Choi and Park, 2023)에서 작업 공간이 높을수록 허리 굽힘이 줄어 그에 따른 부하가 절감되는 것과 유사한 경향을 보이고, 따라서 New 탑차가 기존 차량 대비 작업 자세가 개선된 설계를 적용했을 가능성을 의미하며, 작업자의 신체 부담 경감 효과 및 근골격계 질환 예방 측면에서 긍정적인 시사점을 제공한다.

또한, New 탑차는 대퇴이두근(BF)에서도 효과적인 경감 효과를 보였고, 이는 기존 연구와 유사한 경향을 보였다. Jeong and Chung (2021)의 연구에 따르면, 바로 선 자세에서 스쿼트 시, 무릎 서기 자세의 스쿼트보다 무게 중심의 위치가 높고 지지 기반이 작음으로 인해 자세 안정성이 낮아 대퇴이두근의 근활성도가 증가하였다고 보고하였다. 본 연구에서는 허리 굽힘이 적고 무게 중심이 더 높은 New 탑차보다 허리 굽힘이 비교적 크고 무게 중심이 더 낮은 저상 탑차에서 근활성도가 증가하였는데, 이는 New 탑차에서 허리를 비교적 세운 상태에서 중량물을 들고 걷는 반면, 저상 탑차에서는 허리를 더 많이 굴곡하여 중량물을 들고 걸어, 무게 중심이 더 앞으로 쏠리기 때문에 자세 안정성이 떨어져, 이러한 결과가 나온 것으로 해석할 수 있다. 따라서, New 탑차의 설계는 다른 탑차 대비 자세 안정성이 더 좋을 수 있음을 시사한다고 할 수 있다.

반면, New 탑차는 일부 근육[특히, 어깨(UT)와 종아리 앞부분(TA)]에서 다른 차종에 비해 상대적으로 높은 근활성도가 나타났다. 상부승모근(UT)의 경우, 다른 근육보다는 근활성도가 낮지만, 50%ile에서 New 탑차가 일반 및 저상 탑차 대비 5.76~72.82% 높게 나타났는데, 이는 New 탑차의 작업 환경이 허리 및 하지 근육 부담을 줄이는 반면, 상체(특히 어깨) 사용이 상대적으로 증가하는 방식으로 보완되었을 가능성이 있다. 일반적으로 작업 중 팔을 들어 올리는 빈도가 증가하면 상부승모근의 사용이 많아질 수 있는데, New 탑차에서의 작업 자세가 어깨 사용 빈도에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. Kim and Kim (2016) 연구에 따르면, 견갑골의 비정상적인 움직임은 상부승모근의 과도한 활성화를 유발할 수 있는데, 다른 탑차와 달리 중량물을 한 번에 옮기고, 중량물을 들고 있는 위치와 적재 공간 사이의 높이가 상대적으로 높기 때문에, New 탑차에서 작업할 경우, 이러한 요인으로 인해 작업자의 상부승모근에 부담 영향을 끼친다고 해석할 수 있다. 따라서, New 탑차 설계에서 적재 위치 개선 등을 통해 어깨 부담에 대한 보완을 고려할 필요가 있다. 다만, 상부승모근의 평균 근활성도는 6.47%MVC로 허리 근육인 척추기립근(30.88%MVC), 허벅지 근육[대퇴이두근(BF): 23.42%MVC; 외측광근(VL): 20.22%MVC], 종아리 근육[외비복근(GASL): 20.33%MVC; 전경골근(TA): 19.33%MVC]들에 비해 상대적으로 상차 작업에 기여하는 바가 매우 낮으므로, 차선의 개선 사항이라고 사료된다.

또한, New 탑차에서 전경골근(TA)의 90%ile이 유의하게 높은 근활성도를 보였는데, 이는 작업 방법에서 발목과 하퇴부 근육의 부담을 증가시키는 요인이 있을 수 있음을 시사한다. 전경골근은 발의 앞부분을 들어올려 발 뒤꿈치를 지면에 닿게 하는 역할을 하는데, Gi et al. (2008)의 연구에 따르면, 일반 보행보다 강하고 힘차게 걷는 파워 보행에서 전경골근의 근활성도가 더 높게 나타났다. 이는 본 연구에서 New 탑차 작업 시, 중량물을 들고 바로 화물칸으로 들어가기 때문에, 다른 차량에서 작업하는 것보다 강하고 힘찬 보행을 하여 전경골근의 부하가 더 높아졌다고 해석할 수 있다. 또한, Frost et al. (2010) 연구에 따르면, 발목 안정성과 균형 유지가 중요한 조건에서 전경골근이 더 적극적으로 활성화되는데, 이는 New 탑차에서 적재 방식이 변화하면서 보행 중 안정성을 유지해야 하는 요구가 증가했을 가능성이 있다고 해석할 수 있다. 따라서 전경골근의 높은 근활성도는 보행 패턴 및 강도 변화, 작업 방식 차이로 인해 발생했을 가능성이 크다.

4.2.2 AMS

본 연구에서 분석한 AMS 시뮬레이션 예측 결과, EMG와 유사한 경향을 보였는데, 평균적으로는(50%ile), New 탑차가 일반 및 저상 탑

차보다 상차 작업의 주요 근육 부하 신체 부위인 허리와 허벅지 근육에서 약 0.66~88.72%[척추기립근(ES): 0.66~16.64%, 대퇴이두근(BF): 81.43~88.72%] 낮은 근활성도를 보였다. 그 외의 근육(VL, TA, GASL)에서도 New 탑차가 일반 및 저상 탑차보다 약 15.03~88.20%[외측광근(VL): 15.03~20.98%, 전경골근(TA): 56.29~61.87%, 외비복근(GASL): 82.99~88.20%] 낮은 근활성도를 보였다. 다만, 어깨 근육에서 EMG 결과와 유사하게 상대적으로 일반과 저상 탑차에 비해 높은(12.57~13.26%) 근활성도를 보였다.

최대값에 가까운 EMG 데이터의 90%ile에서도, New 탑차가 일반 또는 저상 탑차보다 BF, GASL 즉 허벅지와 종아리 뒷부분 근육에서 약 2.93~20.53%[대퇴이두근(BF): 2.93%(저상탑차), 외비복근(GASL): 16.44~20.53%] 낮은 근활성도를 보인 반면, ES, UT, VL, TA 즉 허리, 어깨, 허벅지와 종아리 앞부분 근육에서 약 5.20~108.02%[척추기립근(ES): 43.72~49.58%, 상부승모근(UT): 27.80~38.67%, 외측광근(VL): 68.14~108.02%, 전경골근(TA): 5.20~61.06%] 높은 근활성도를 보였다.

따라서, 근활성도(AMS) 예측 결과를 통해, New 탑차의 평균적인 근육 부하는 여러 근육들을 포함한 주요 근육들에서 일반 탑차와 저상 탑차보다 낮아 작업자의 근육 부담 완화에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 50%ile 기준, New 탑차는 어깨 근육을 제외한 모든 근육에서 다른 차량보다 근활성도가 낮았는데, 특히 대퇴이두근(BF)과 외비복근(GASL)에서 일반 탑차 대비 81.43~82.99%, 저상 탑차 대비 88.20~88.72% 낮아, New 탑차가 하지 부담을 줄이는데 효과적일 수 있음을 시사한다. 다만, 90%ile 기준, New 탑차는 척추기립근(ES), 상부승모근(UT), 외측광근(VL), 전경골근(TA)에서 높은 근활성도를 보였으며, 특히 외측광근과 전경골근에서 저상 탑차보다 높은 경향을 보였는데, 이는 EMG의 결과와 유사하였다.

4.3 Limitation and future work

본 연구는 총 20명의 피험자를 대상으로 실험을 수행하였으나, 신뢰도 기준을 충족한 5명의 데이터만을 분석하였다. 이러한 정제된 분석 표본은 실험 결과의 내부 타당성을 확보하는데 기여할 수 있으나, 통계적 검정력(statistical power)의 제한 및 일반화 가능성 측면에서 한계가 존재한다. 또한, 본 연구에서는 작업물의 무게(5kg)와 작업 방식(2개씩 상차)을 통제하여 분석을 수행하였기 때문에, 실제 택배 작업 현장의 다양한 작업 조건을 모두 반영하기에는 다소 제약이 있을 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 보다 다양한 무게 및 상차 방식, 충분한 수의 피험자를 확보하여 실제 작업 환경과 유사한 조건에서 실험을 수행함으로써, 연구 결과의 외적 타당도를 높일 필요가 있다.

또한, 4.1절(EMG vs. AMS: Trend-Based Comparison)에서 언급한 것과 같이 AMS와 EMG는 다소 상이한 결과를 보이는데, 이를 보완하기 위해 실제 EMG와 높은 일치도를 보이는 AMS 근육군 별 세부 근육 범위를 분석하고, 비교 검증하는 후속 연구를 수행할 필요성이 있다. 이러한 후속 연구를 통해 AMS의 신뢰성을 높인다면, 향후 EMG를 사용할 수 없는 환경에서 EMG 대신 AMS를 활용한 시뮬레이션 분석을 통해 시간과 비용을 줄일 수 있는 효과적인 방안으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

다만, 본 연구에서는 Xsens 데이터를 AMS 시뮬레이션의 입력 정보로만 활용하였기 때문에, Xsens 데이터를 독립적인 분석 대상으로 활용하거나, Xsens-EMG 간 직접 비교를 통한 해석은 수행하지 않았다. 향후 연구에서는 Xsens 기반의 동작 분석 정보와 EMG 신호 간의 직접적인 비교를 통해, 시뮬레이션 기반 분석의 정확도와 신뢰도를 보다 명확히 검증하는 절차가 추가될 필요가 있다.

5. Conclusions

본 연구는 다양한 택배 차량 유형(일반, 저상, New 탑차)에 따른 상차 작업 시, 실측 기반의 EMG 분석과 시뮬레이션 기반의 AMS 분석을 통해 작업자의 근육 부담을 비교함으로써, AMS의 예측 타당성과 현장 적용 가능성을 종합적으로 검토하고자 하였다. 분석 결과, New 탑차에서 허리 및 하지 부위의 근활성도가 일반 및 저상 탑차보다 낮아, 근골격계 부담 완화에 긍정적인 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 또한, EMG와 AMS 간의 결과는 일부 근육에서 유사한 경향을 보여, 시뮬레이션 기반 분석 도구인 AMS가 특정 조건에서 실측 기반 평가를 보완할 수 있는 가능성을 시사하였다. 한편, 전경골근(TA) 등 일부 근육에서는 두 분석 결과 간 상이한 양상이 나타났으며, 이는 기존 연구(Wibawa et al., 2013; Wibawa et al., 2016)에서 지적한 바와 같이, 표면 근육만 측정하는 EMG와 심부 근육까지 포함하는 AMS의 구조적 차이에 기인한 것으로 해석된다.

본 연구 결과에서 AMS 분석값이 EMG 결과보다 특정 근육에서 다소 높거나 낮게 나타난 경향이 있었는데, 이는 EMG와 AMS의 데이터 수집 방식 차이를 반영한 것으로 해석될 수 있다. 기존 연구(Hicks et al., 2015)에서도 근육 활성 패턴 분석 시 단순한 통계 비교를 넘어, 모델 결과의 전반적인 생체역학적 해석이 중요하다고 강조한 바 있다. 따라서, 본 연구에서는 차량 및 근육별 근활성도를 종합적으로 분석하여 New 탑차의 설계적 특성이 작업자의 근골격계 부담에 미치는 영향을 해석하였다. 이를 통해, New 탑차가 특정 근육군에서 기존 차량 대비 부담을 줄이는 효과가 있음을 확인하였으며, 이러한 결과는 이후 실무적 설계 방향 논의의 기초 자료로 활용될 수 있다.

또한, 이러한 분석 결과는 택배 차량의 향후 설계 시, 근육 활성도에 기반한 인간공학적 설계 방향을 도출하는 데 기여할 수 있다. 첫째, New 탑차에서 관찰된 근육 부담의 감소 경향은, 작업자의 허리와 하체 부담을 줄이기 위해 적절한 화물칸 높이 확보 및 작업 공간의 직립 자세 유도 설계가 효과적임을 시사한다. 둘째, 저상 탑차에서 나타난 허리와 하지 근육의 부담 증가는, 지하주차장 진입이 가능하면서도 허리를 과도하게 굽히지 않아도 되는 차량 설계 개선의 필요성을 보여준다. 셋째, 일부 근육군(UT, TA 등)에서 관찰된 상대적으로 높은 근활성도는 작업 방식의 변화나 보행 중 균형 유지에 대한 요구 증가와 관련된 것으로 해석된다. 이에 따라, 상지의 근육 부담을 줄이고 하지의 안정성을 확보하기 위해, 적재 위치의 최적화, 미끄럼 방지 바닥재 적용, 균형 유지를 돕는 보조 손잡이 등의 설계적 보완이 요구된다. 따라서 향후 택배 차량 개발 시, 차량 구조와 작업 높이 간의 상호작용에 대한 생체역학적 분석 결과를 바탕으로, 작업자의 근골격계 부담을 최소화할 수 있는 설계 요소를 반영할 필요가 있다.

본 연구는 기존의 실험실 기반 단일 동작 중심의 연구들과 달리, 실제 산업 환경과 유사한 상차 작업을 대상으로 다양한 차량 조건(일반, 저상, New 탑차)에서의 근육 부하를 EMG와 AMS를 통해 통합적으로 비교 분석하였다. 이를 통해 AMS의 예측 결과를 보다 현실적인 작업 맥락에서 평가하였으며, 일부 근육군에서는 EMG와 유사한 경향성이 확인되었다. 이러한 결과는 향후 EMG 사용이 어려운 산업 현장에서 AMS가 대체 분석 도구로 활용될 수 있는 가능성을 시사한다.

다만, AMS의 예측 신뢰도와 실무 적용 가능성을 향상시키기 위해서는 근육별 분석 범위의 정교화, 시뮬레이션 모델링 기법의 고도화, 다양한 작업 조건을 반영한 분석 설계가 병행되어야 하며, 특히 실제 산업 현장에서 EMG와 AMS를 병행 적용하여 두 분석법 간 일치도를 지속적으로 검증하는 후속 연구가 요구된다. 이러한 접근은 근골격계 부담을 최소화할 수 있는 최적의 작업 환경 및 차량 설계를 과학적으로 도출하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant RS-2021-KA163201).

References

Bussey, M.D., Aldabe, D., Adhia, D. and Mani, R., Reliability of surface electromyography activity of gluteal and hamstring muscles during sub-maximal and maximal voluntary isometric contractions, *Musculoskeletal Science and Practice*, 34, 103-107, 2018.

Choi, J.K. and Park, J.H., Analysis of the Lifting Work Posture in a Low Roof Delivery Vehicle using a 3D Motion Analysis System, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 42(4), 305-313, 2023.

Damsgaard, M., Rasmussen, J., Christensen, S.T., Surma, E. and De Zee, M., Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(8), 1100-1111, 2006.

Fritzsche, L., Galibarov, P.E., Gärtner, C., Bornmann, J., Damsgaard, M., Wall, R., Schirrmeister, B., Gonzalez-Vargas, J., Pucci, D., Maurice, P., Ivaldi, S. and Babič, J., Assessing the efficiency of exoskeletons in physical strain reduction by biomechanical simulation with AnyBody Modeling System, *Wearable Technologies*, 2, e6, 2021.

Frost, D.M., Cronin, J. and Newton, R.U., A biomechanical evaluation of resistance: fundamental concepts for training and sports performance, *Sports Medicine*, 40, 303-326, 2010.

Gautam, K., Hefzy, M.S., Mustapha, A.A. and Kyle, B., Comparison of Opensim and Anybody modeling system™ predictions in biomechanical modeling of upper extremities, *International Journal of Research in Orthopaedics*, 10(4), 717, 2024.

Gi, S.J., Chae, W.S., Kang, N.J., Jang, J.I. and Yoon, C.J., The Comparative Analysis of EMG Activities on the Lower Limb Muscles during Power Walking and Normal Walking, *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 18(4), 125-133, 2008.

Hermens, H.J., Freriks, B., Merletti, R., Stegeman, D., Blok, J., Rau, G., Disselhorst-Klug, C. and Hägg, G., *European Recommendations for Surface Electromyography: Results of the SENIAM Project*, Roessingh Research and Development b.v., Enschede, 1999. http://www.seniam.org (retrieved February 1, 2025).

Hicks, J.L., Uchida, T.K., Seth, A., Rajagopal, A. and Delp, S.L., Is my model good enough? Best practices for verification and validation of musculoskeletal models and simulations of movement, *Journal of Biomechanical Engineering*, 137(2), 020905, 2015.

Hurley, K., Marshall, J., Hogan, K. and Wells, R., A comparison of productivity and physical demands during parcel delivery using a standard and a prototype electric courier truck, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(4), 384-391, 2012.

Jang, T.W., Kim, H.R., Yoon, J.H., Kang, C.W., Lee, Y.M. and Min, J.H., Appropriate working hours for parcel delivery workers: 2021 research report, Ulsan: Occupational Safety and Health Research Institute, 2021.

Jeong, M.G., Simulation of a musculoskeletal human model using the AnyBody Modeling System, *Computational Design and Engineering Review*, 18(2), 38-46, 2012.

Jeong, T. and Chung, Y., The Effect of Standing and Kneeling Postures on Muscle Activity for Squat, *Physical Therapy Rehabilitation Science*, 10(4), 487-492, 2021.

Ji, Z., Wang, H., Jiang, G. and Li, L., Analysis of muscle activity utilizing bench presses in the AnyBody simulation modelling system, *Modelling and Simulation in Engineering*, 2016(1), 3649478, 2016.

Kim, E.J. and Kim, S.H., A comparison of shoulder stabilizer muscle activities of therapeutic climbing and isometric exercise in patients with shoulder impingement syndrome, *The Journal of Korean Physical Therapy*, 28(2), 88-94, 2016.

Kim, M.J. and Choi, E., Occupational accident compensation insurance coverage and occupational accidents for special-type delivery workers, *Journal of Korean Academy of Community Health Nursing*, 32(1), 64-72, 2021.

Kong, Y.K., Choi, K.H., Cho, M.U., Kim, S.Y., Kim, M.J., Shim, J.W., Park, S.S., Kim, K.R., Seo, M.T., Chae, H.S. and Shim, H.H., Ergonomic assessment of a lower-limb exoskeleton through electromyography and AnyBody modeling system, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 8088, 2022.

Kong, Y.K., Kim, H.Y., Park, S.S., Shim, J.W., Keum, H.J., Son, S.J., Lee, S., Lee, S.K., Chae, U.R. and Shim, H.H., Evaluation for Workloads of Delivery Workers during Loading/Unloading Tasks based on Regular, Low-floor, and EV Newly Designed Delivery Trucks, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 42(4), 369-384, 2023.

Lavender, S.A., Charbonnet, J. and Sommerich, C.M., Biomechanical assessment of alternative hand trucks for transporting heavy loads up and down stairs, *Applied Ergonomics*, 110, 104010, 2023.

Lee, B., Working conditions and health status of delivery workers, *Korean Journal of Occupational Health Nursing*, 28(3), 156-165, 2019.

Mbang Bian, W., Mekoulou Ndongo, J., Richard Guessogo, W., Ebal Minye, E., Ndemba, P.B.A., Gassina, G., Mandengue, S.H. and Temfemo, A., Musculoskeletal disorders and risk factors among heavy load carriers in Yaounde city, Cameroon, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 28(2), 1244-1250, 2022.

National Logistics Information Center. Parcel delivery service sales statistics, 2021. Available at: https://nlic.go.kr/nlic/parcelServiceSales.action (accessed February 1, 2025).

Reilly, M. and Kontson, K., Computational musculoskeletal modeling of compensatory movements in the upper limb, *Journal of Biomechanics*, 108, 109843, 2020.

Siddiqi, A., Arjunan, S.P. and Kumar, D., Improvement of isometric dorsiflexion protocol for assessment of tibialis anterior muscle strength, *MethodsX*, 2, 107-111, 2015.

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.

Szpala, A., Rutkowska-Kucharska, A., Drapała, J. and Brzostowski, K., Choosing the right body position for assessing trunk flexors and extensors torque output, *Human Movement*, 12(1), 57-64, 2011.

Wagner, D.W., Reed, M.P. and Rasmussen, J., Assessing the importance of motion dynamics for ergonomic analysis of manual materials handling tasks using the AnyBody Modeling System, *Society of Automotive Engineers Transactions*, 116, 2092-2101, 2007.

Wibawa, A.D., Verdonschot, N., Burgerhof, J.G.M., Purnama, I.K.E., Andersen, M.S., Halbertsma, J.P.K., Diercks, R.L. and Verkerke, G.J., "A Validation Study on Muscle Activity Prediction of a Lower Limb Musculoskeletal Model Using EMG During Normal Walking", *Proceedings of the 3rd International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology and Biomedical Engineering (ICICI-BME)*, (pp. 260-264), IEEE, 2013.

Wibawa, A.D., Verdonschot, N., Halbertsma, J.P.K., Burgerhof, J.G.M., Diercks, R.L. and Verkerke, G.J., Musculoskeletal modeling of human lower limb during normal walking, one-legged forward hopping and side jumping: Comparison of measured EMG and predicted muscle activity patterns, *Journal of Biomechanics*, 49(15), 3660-3666, 2016.

Woo, S.B., Choi, S.Y. and Park, U., Labor and Occupational Safety and Health Status and Challenges of Delivery Workers, *Korea Federation of Trade Unions Central Research Institute*, Research Series, 2022(5), 1-232, 2022. http://re.inochong.org (retrieved February 1, 2025).

Zhou, J. and Wiggermann, N., "Physical Stresses on Caregivers When Pulling Patients Up in Bed: Effect of Repositioning Aids and Patient Weight", *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), (pp. 1057-1061), Los Angeles. CA., 2019.

Zhu, Y., Li, H., Lyu, S., Shan, X., Jan, Y.K. and Ma, F., Stair-climbing wheelchair proven to maintain user's body stability based on AnyBody musculoskeletal model and finite element analysis, *PLoS One*, 18(1), e0279478, 2023.

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: Master's Student, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Areas of interest: Physical ergonomics, Ergonomics design, Workplace ergonomics

Suk Lee: slee@krri.re.kr
Highest degree: Doctor's degree, Department of Industrial Engineering, KAIST
Position title: Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute
Areas of interest: Supply Chain Management, Cold Chain, Logistics standardization

Soon-Kyo Lee: sklee@krri.re.kr
Highest degree: Doctor's degree, Department of Industrial Engineering, Korea University
Position title: Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute
Areas of interest: Supply Chain Finance, Artificial Intelligence in logistics

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