JESK J Ergon Soc Korea 2026; 45(4): 429-446
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2026.45.4.429
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Evaluation of the Effects of a Passive Back-Support Exosuit on Physical Workload during Manual Material Handling in Agricultural Work

Sang-soo Park[1], Hyocher Kim[2], Hyeseon Chae[1], Insoo Kim[1], Sooin Park[1], Mintae Seo[1]

[1]National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Jeonju, 54875
[2]Korea National University of Agriculture and Fisheries, Department of Liberal Arts, Jeonju 54874

농작업 중량물 취급을 위한 허리보조 웨어러블 슈트의 신체 부담 감소 효과 평가

박상수[1], 김효철[2], 채혜선[1], 김인수[1], 박수인[1], 서민태[1]

[1]농촌진흥청 국립농업과학원
[2]국립한국농수산대학교 교양학부

Corresponding Author
Mintae Seo
National Institute of Agricultural Sciences,
Rural Development Administration,
Jeonju, 54875
Email : mtseo85@korea.kr

Received : August 07, 2026
Revised : August 17, 2026
Accepted : August 20, 2026

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

Objective: This study evaluated the effects of a passive back-support exosuit on muscle activity and perceived physical workload during simulated agricultural manual material handling.

Background: Passive back-support devices can reduce the muscular demands associated with lifting and trunk flexion without powered actuation. However, their effectiveness can vary with task mechanics, movement phase, and asymmetry, which is particularly relevant to agricultural material-handling tasks involving both stooping and trunk rotation.

Method: Eight healthy adult men performed repeated manual handling of a 20kg harvest box under two conditions: without the exosuit (WO) and with the exosuit (W). Stooping and twisting tasks were divided into 'Lifting', 'Holding', and 'Lowering' phases. Bilateral electromyographic activity of the erector spinae (ES), vastus lateralis (VL), biceps femoris (BF), and upper trapezius (UT) was normalized to maximum voluntary contraction (%MVC). Trial-level %MVC data were analyzed using log-linear mixed models with participant as a random effect, and W versus WO contrasts were adjusted using the Holm method. For the twisting task, muscle activity was additionally classified as Start-side or End-side according to the direction of box transfer. Paired subjective ratings were analyzed using Wilcoxon signed-rank tests.

Results: During stooping, ES and VL activity was significantly lower with the exosuit during Lifting, Holding, and Lowering, while UT activity was significantly lower during Lifting and Holding. The largest mean reduction was observed in VL during Lifting (39.1%). During twisting, significant reductions were dependent on side and movement phase. ES activity decreased on the Start-side during Lifting and Lowering and on the End-side during Lifting. VL activity decreased during Start-side Lifting and during all three phases on the End-side, while UT activity decreased during Start-side Lifting. BF activity did not differ significantly between conditions. Whole-body perceived exertion and low-back discomfort were significantly lower with the exosuit during both tasks after Holm adjustment.

Conclusion: The passive back-support exosuit reduced muscular and perceived physical workload most consistently during stooping, whereas its effects during twisting depended on the relative side and movement phase. No statistically significant increase was detected in BF activity or the assessed subjective body regions; however, the small sample size does not exclude the possibility of load redistribution.

Application: A passive back-support exosuit may help reduce physical workload during agricultural material handling, particularly in repetitive stooped lifting. Further field studies involving farmers and prolonged work periods are needed to determine the durability of these effects, task-specific suitability, and user acceptance.

Keywords: Passive exosuit, Back-support, Manual material handling, Physical workload, Agriculture

1. Introduction

농업은 작목, 계절 및 재배환경에 따라 작업 방식과 작업조건이 크게 달라지며, 여전히 작업자의 신체적 노동에 대한 의존도가 높은 산업이다. 특히 수확상자, 비료포대, 농자재 등을 취급하는 과정에서는 반복적으로 물체를 들어 올리고 내리거나 옮겨야 하며, 이때 허리 굽힘이나 무릎 굽힘, 몸통 회전과 같은 동작이 빈번하게 발생한다. 국내 농작업에서도 이러한 부자연스러운 작업자세와 반복적인 중량물 취급이 주요 근골격계 위험요인으로 보고되어 왔다(Kim et al., 2006; Kee and Haslam, 2019).

실제로 국내 농업인의 근골격계질환은 지속적으로 관리가 필요한 문제로 나타나고 있다. 2024년 기준 국내 농가수는 약 97만 4천 가구, 농가인구는 약 200만 4천 명이며(Statistics Korea, 2025), 농작업 관련 질병으로 1일 이상 휴업한 농업인의 유병률은 5.8%로 조사되었다. 질병 종류별로는 근골격계질환의 유병률이 5.4%로 가장 높았으며, 주요 발생 부위는 허리(48.2%)와 무릎(38.7%) 순으로 나타났다(RDA, 2025). 이는 농작업으로 인한 근골격계 부담을 줄이기 위해 허리를 중심으로 하되 하지에 미치는 영향도 함께 살펴볼 필요가 있음을 보여준다.

특히 허리 부위의 부담은 농업인뿐 아니라 전 세계적으로도 중요하게 다루어지고 있다. 요통은 전 세계적으로 장애를 유발하는 주요 건강문제 중 하나이며, 2020년에는 약 6억 1,900만 명이 요통의 영향을 받은 것으로 추정되었다(WHO, 2023). 농업에서는 반복적인 중량물 들기, 장시간의 허리 굽힘, 불안정한 작업자세 등이 빈번하게 나타나며, 이러한 작업 특성이 허리의 근골격계 부담과 관련될 수 있음이 보고되어 왔다(Fathallah, 2010). 따라서 농작업 중 반복되는 중량물 취급에서 허리에 가해지는 부담을 줄이는 것은 농업인의 근골격계질환 예방 측면에서 중요하다.

중량물 취급에 따른 신체 부담은 물체의 무게만으로 결정되지 않는다. 물체의 수평·수직 위치와 이동거리, 반복빈도, 작업시간, 파지조건뿐 아니라 몸통이 틀어진 상태에서 작업하는 정도, 즉 비대칭 각도 역시 작업 부담에 영향을 미치는 주요 요인으로 알려져 있다(Marras et al., 1995; NIOSH, 2024). 실제 농작업에서도 작업자가 항상 정면에서만 중량물을 취급하는 것은 아니며, 주변의 수확물이나 농자재를 옮기는 과정에서 몸통을 좌우로 회전하면서 작업하는 경우가 발생한다. 따라서 농작업의 중량물 취급 부담을 평가하기 위해서는 정면에서 이루어지는 대칭적인 들기뿐 아니라 몸통 회전이 포함된 비대칭 작업도 함께 고려할 필요가 있다.

이러한 중량물 취급 부담을 줄이기 위해서는 작업방법 개선이나 기계화 등 다양한 접근이 가능하다. 그러나 농작업은 작업공간과 지면 상태가 일정하지 않고 작목이나 작업단계에 따라 작업 위치와 자세가 달라지기 때문에 작업 자체를 일정한 형태로 표준화하거나 모든 중량물 취급을 기계화하는 데에는 현실적인 제약이 있다. 이에 따라 기존 작업 방식을 크게 변경하지 않으면서 작업자의 신체 부담을 직접 줄일 수 있는 착용형 보조장비도 하나의 대안으로 고려할 수 있다.

허리보조 착용형 장비는 작업자의 몸에 착용하여 중량물 취급이나 전방 굴곡 시 발생하는 허리 신전 요구량의 일부를 보조하도록 설계된다. 이러한 장비는 문헌에 따라 이들 용어가 명확히 구분되지 않고 사용되기도 하지만 구조 및 소재적으로는 강성 구조를 갖는 허리보조 외골격(exoskeleton)과 섬유 및 탄성 소재 등을 활용한 유연한 웨어러블 슈트(exosuit) 등으로 분류되고 있다. 또한 작동 방식

에 따라서는 모터 등의 구동장치를 이용하여 보조력을 제공하는 능동형(active)과 모터나 배터리 없이 탄성체 또는 스프링의 복원력을 이용하는 패시브(passive)형으로 구분된다. 그 중 패시브형 소프트 슈트는 구조가 비교적 단순하고 유연하여 착용 중 작업자의 움직임을 비교적 자유롭게 유지할 수 있다는 특징이 있다(Ali et al., 2021).

허리보조 착용형 장비의 효과는 다양한 중량물 취급 작업에서도 확인되어 왔다. 패시브형 소프트 슈트인 Personal Lift Augmentation Device (PLAD)는 대칭 들기 작업에서 척추기립근의 EMG를 감소시켰으며(Abdoli-E et al., 2006), 비대칭 들기에서도 요추 모멘트와 척추기립근의 요구량을 완화하는 것으로 나타났다(Abdoli-E and Stevenson, 2008). 산업 조립 작업에서도 PLAD 장비 착용에 따른 허리 근활동과 주관적 부담의 감소가 관찰되었으며(Graham et al., 2009), 패시브형 소프트 허리보조 슈트를 이용한 연구에서도 여러 형태의 짧은 들기·내리기 과제에서 척추기립근 활동이 감소하는 것으로 보고되었다(Goršič et al., 2021).

그러나 허리 근활성도의 감소만으로 착용형 장비의 효과를 판단하기에는 한계가 있다. 장비에서 제공되는 보조력은 작업자의 자세나 관절 움직임에 영향을 주어 허리 이외의 다른 근육에 요구되는 힘을 변화시킬 수 있으며, 착용감이나 움직임의 자유도에도 영향을 미칠 수 있다. 착용 시 전방 굴곡 작업에서 허리 근활동과 불편도가 감소한 결과가 보고된 반면(Bosch et al., 2016), 일부 동적 작업에서는 수행성과 사용 편의가 저하되기도 하였다(Baltrusch et al., 2018). 또한 서로 다른 허리보조 장비를 대칭 및 비대칭 반복 들기 작업에 적용했을 때 근활동과 작업자세의 변화가 장비에 따라 다르게 나타났다(Madinei et al., 2020). 따라서 허리보조 장비의 효과를 평가할 때에는 허리 근육의 변화뿐 아니라 작업유형과 동작구간, 허리 이외 신체 부위의 반응을 함께 살펴볼 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 농작업의 중량물 취급 상황을 모사한 실험실 작업을 통해 패시브형 허리보조 웨어러블 슈트의 착용이 근활성도와 주관적 부담에 미치는 영향을 평가하였다. 작업유형은 정면에서 수행하는 Stooping과 좌우 방향으로 중량물을 이동하는 Twisting으로 구분하였으며, 각 작업은 Lifting, Holding 및 Lowering 구간으로 나누어 분석하였다. 척추기립근(ES)을 주요 평가근으로 설정하고, 슈트 착용에 따른 부담이 다른 신체 부위로 전이되는지를 확인하기 위해 외측광근(VL), 대퇴이두근(BF) 및 상부승모근(UT)을 함께 분석하였다. 특히 Twisting 작업은 상자의 이동 시작점과 종료점을 기준으로 Start-side와 End-side로 재분류하여, 슈트 착용에 따른 효과가 상대적인 작업측과 동작구간에 따라 어떻게 달라지는지를 검토하였다.

2. Method

2.1 Participants

본 연구에 사용된 초기 시제품이 농작업 현장에서 수확상자와 같은 중량물의 운반 및 적재 작업이 주로 성인 남성에 의해 수행되는 점을 고려하여 60~69세 남성의 50분위 인체치수를 기준으로 제작된 점과, 소규모 탐색연구에서 성별에 따른 신체치수 및 장비 적합성의 이질성을 줄이기 위해 연구 참여자를 남성으로 제한하였다. 또한 본 연구는 자체 개발한 웨어러블 슈트의 단기적인 신체 부담 감소 효과를 확인하기 위한 탐색적 반복측정 연구로, 모든 참여자가 착용 및 미착용 조건을 모두 수행하는 피험자 내 설계와 실험 수행 가능성을 고려하였다. 이를 통해 전신에 근골격계질환 병력이 없는 건강한 성인 남성 8명을 표본으로 설정하여 실험을 수행하였다. 연구 참여자의 일반적 특성은 Table 1에 제시하였다.

연구 참여자는 최근 1년 이내에 허리, 어깨 또는 하지 부위의 통증이나 손상으로 진료를 받은 경험이 없고, 20kg의 중량물을 들어 올리는 데 신체적 제한이 없는 사람으로 구성하였다. 또한 본 연구는 인간대상연구로, 헬싱키 선언(Declaration of Helsinki)의 윤리 원칙을 준수하여 수행되었으며 연구 참여자들에게 연구 목적 및 실험 절차에 대해 충분히 설명한 후 자발적인 동의를 받았다.

Table 1. Anthropometric data of the participants (Mean ± Standard Deviation)

Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)
37.0±4.1	176.1±3.7	80.2±2.7

2.2 Experimental design

본 연구는 허리보조 웨어러블 슈트의 착용 여부에 따른 신체 부담을 비교하기 위한 피험자 내 반복측정 설계(within-subject repeated-measures design)로 구성하였다. 모든 연구 참여자가 장비 미착용 조건과 착용 조건을 모두 수행하도록 하였으며, 실험조건은 다음과 같이 정의하였다.

- WO (Without Exosuit): 웨어러블 슈트를 착용하지 않고 중량물 취급 작업을 수행하는 조건
- W (With Exosuit): 웨어러블 슈트를 착용한 상태에서 중량물 취급 작업을 수행하는 조건

실험에 사용한 중량물은 수확상자를 사용하였으며 수확상자의 총 중량은 20kg으로 설정하였다. 수확상자의 크기는 520*360*320mm였으며, 상자 내부에 분동을 중앙부에 단단하게 고정하여 작업 중 무게중심이 이동하지 않도록 하였다.

본 연구에서는 실제 농작업 중 중량물 취급 과정에서 빈번하게 발생하는 허리 굽힘과 몸통 비틀림을 반영하기 위해 허리굽혀 들어올리기(Stooping)와 허리 비틀어 들어 옮기기(Twisting)의 두 가지 작업유형을 선정하였다.

첫 번째 작업유형은 허리굽혀 들어 올리기(Stooping) 작업이었다. 연구 참여자는 정면의 바닥에 놓인 20kg 수확상자를 양손으로 잡은 후 허리를 반듯하게 앞으로 굽힌 자세에서 상자를 들어 올리고, 상자를 들어올린 자세에서 2초간 유지한 뒤 다시 최초 위치로 내려놓았다. 이 작업은 주로 시상면상에서 수행되는 대칭형 중량물 취급 작업으로 구성하였다. 연구 참여자는 WO와 W 조건에서 각각 6회의 Stooping 작업을 수행하였다. 수확상자의 위치는 연구 참여자의 정면에 배치하였으며 작업자별 신체치수를 고려하여 자연스러운 자세로 상자를 파지할 수 있는 거리로 개별 조정한 후 모든 실험조건에서 동일하게 유지하였다.

두 번째 작업유형은 허리 비틀어 들어 옮기기(Twisting) 작업이었다. 연구 참여자는 신체의 한쪽 바닥에 놓인 20kg 수확상자를 들어올린 뒤 몸통을 반대 방향으로 회전하여 반대편 작업지점에 내려놓았다. 작업은 좌측에서 우측으로 이동하는 조건(Left-to-Right, LtoR)과 우측에서 좌측으로 이동하는 조건(Right-to-Left, RtoL)으로 구분하였다. 각 장비 조건에서 LtoR 작업 4회와 RtoL 작업 4회를 수행하여 총 8회의 Twisting 작업을 실시하였다. 좌우 작업지점은 연구 참여자의 정면을 기준으로 각각 좌우 60° 지점에 배치하여 두 지점이 총 120°를 이루도록 하였다. 작업자와 수확상자 간 거리는 각 참여자가 자연스러운 자세로 상자를 파지할 수 있는 위치로 개별 조정하였으며, 설정된 위치는 해당 참여자의 모든 실험조건에서 동일하게 유지하였다.

각 단위 작업은 동작의 진행 단계에 따라 들어 올리기(Lifting), 유지하기(Holding), 내려놓기(Lowering)의 세 구간으로 구분하였다. Lifting 구간은 수확상자가 바닥에서 이탈한 시점부터 연구 참여자가 상자를 든 상태에서 몸통과 무릎을 펴고 직립자세에 도달한 시점까지로 정의하였다. Holding 구간은 직립자세에 도달한 시점부터 수확상자를 동일한 자세로 2초간 유지하는 구간으로 정의하였다. Lowering 구간은 2초의 유지 동작이 종료된 후 수확상자를 내리기 시작한 시점부터 상자가 바닥에 완전히 닿은 시점까지로 정의하였다.

두 실험조건과 두 작업유형의 수행 순서는 무작위로 배정하여 조건 및 작업순서에 따른 학습효과와 피로효과를 최소화하였다. 각 조건 혹은 작업유형 사이에는 5분 이상의 휴식시간을 제공하여 이전 작업에서 발생한 근육 피로의 영향을 줄였다.

실험조건 및 작업별 반복 횟수는 Table 2에 제시하였으며, 각 작업유형의 구간 자세는 Figure 1과 같다.

Table 2. Experimental conditions and number of trials (performed in a randomized order)

	Stooping	Twisting
WO (Without exosuit)	6 trials	8 trials in total (4 per direction)
W (With exosuit)	6 trials	8 trials in total (4 per direction)

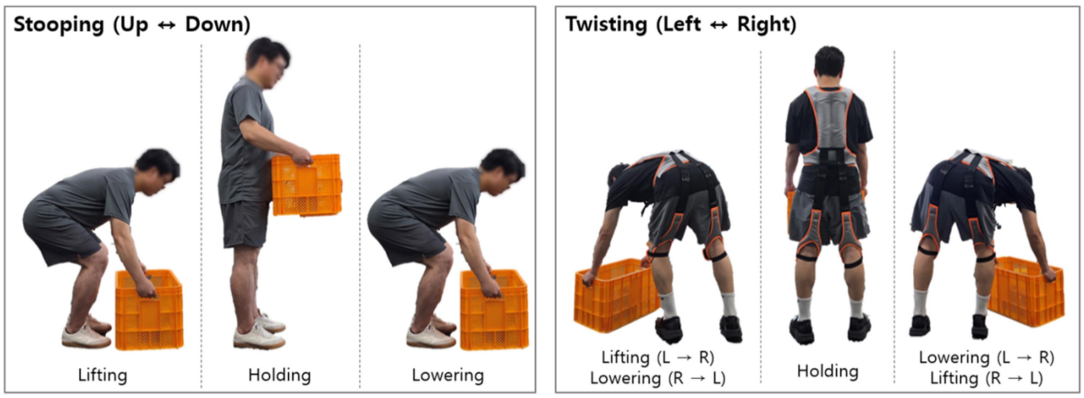


Figure 1. Experimental tasks: Stooping task (left) and Twisting task (right)

2.3. Apparatus

2.3.1 Passive back-support exosuit

본 연구에서는 농작업 중 중량물 취급으로 인한 허리 및 주변 근육의 부담을 줄이기 위해 자체 개발한 패시브형 허리보조 웨어러블 슈트를 사용하였다. 해당 장비는 별도의 모터나 배터리를 사용하지 않고 인장스프링의 탄성력을 이용하여 중량물 취급 시 허리와 몸통의 움직임을 보조하는 소프트 슈트 형태로 제작하였다.

웨어러블 슈트는 상체 착용부, 하체 고정부 및 허리 보호부의 세 부분으로 구성하였다. 상체 착용부는 어깨와 몸통을 통해 장비를 고정하고 스프링의 인장력을 전달하는 역할을 하며, 하체 고정부는 허벅지 또는 하지 부위에 장비를 고정하여 허리 굽힘 동작 중 장비의 위치가 이동하는 것을 방지하도록 구성하였다. 허리 보호부는 허리 주변을 지지하고 상체 착용부와 하체 고정부를 연결하도록 제작하였다.

신체와 직접 접촉하는 부위에는 통기성과 쿠션감을 확보하기 위해 3D Air Mesh 소재를 적용하였고, 스프링의 인장력이 원단의 신축으로 손실되는 것을 최소화하기 위해 주요 하중 전달부에는 코듀라 소재를 적용하였다. 신체 밀착부에는 작업 중 장비가 미끄러지는 것을 줄이기 위한 미끄럼 방지 처리를 적용하였으며, 착용자의 신체치수에 따라 고정 위치와 조임 정도를 조절할 수 있도록 벨크로 방식의 파스너를 사용하였다.

허리보조를 위한 탄성력은 연구 참여자의 흉추부에 해당하는 등 부위의 좌우에 병렬로 배치된 2개의 인장스프링을 통해 제공되도록 구성하였다. 사용된 인장스프링은 자유장 150mm, 선경 1.6mm, 외경 13mm이며, 각 스프링의 인장력은 198.5N이었다. 스프링과 슈트의 연결부에는 부식에 강한 고강도 금속 소재를 적용하였다. 연구 참여자가 몸통을 굴곡하면 등 부위에 배치된 인장스프링이 신장되며, 이후 몸통을 신전하는 과정에서 스프링의 탄성력이 몸통 신전을 보조하도록 설계하였다. 이러한 보조구조는 중량물 취급 시 허리 신전근에 요구되는 부하를 일부 보조하는 것을 목적으로 하였다. 스프링의 선정은 20kg의 중량물을 취급하는 Stooping 자세에서 요추부 부담을 줄이기 위한 3D Static Strength Prediction Program 분석 결과와 상체 질량에 대한 보조목표를 바탕으로 이루어졌다. 다만 스프링의 사양에 제시된 인장력은 장치에 사용된 스프링 자체의 특성을 나타내며, 실제 착용 중 신체에 전달되는 보조력은 몸통 굴곡 각도, 스프링의 신장 길이 및 힘의 전달 방향 등에 따라 달라질 수 있다.

장비의 기본 치수는 Size Korea 제8차 인체치수자료 중 60~69세 남성 50분위에 해당하는 신장 168.1cm와 체중 69.7kg을 기준으로 제작하였다(KATS, 2021). 다양한 신체치수의 연구 참여자가 착용할 수 있도록 상체, 허리 및 하지의 고정부 길이를 조절할 수 있게 구성하였다. 장비의 총중량은 950g이었으며, 누구나 쉽게 혼자서 착용이 가능하도록 제작되었다. 웨어러블 슈트의 전체 외형과 주요 구성 부위는 Figure 2에 제시하였으며, 웨어러블 슈트 착용 모습은 Figure 3에 제시하였다.

Figure 2. Detailed structure of the passive back-support exosuit

Figure 3. Wearing configuration of the passive back-support exosuit

2.3.2 Electromyography (EMG)

허리보조 웨어러블 슈트 착용 여부에 따른 근육부하를 정량적으로 평가하기 위해 무선 근전도 시스템 Desktop DTS (Noraxon Inc., AZ, USA)를 사용하였다. 근전도는 중량물 취급 시 허리, 하지 및 어깨 부위에서 주로 사용되는 양측 상부승모근(Upper Trapezius, UT), 외측광근(Vastus Lateralis, VL), 대퇴이두근(Biceps Femoris, BF) 및 척추기립근(Erector Spinae, ES)의 총 8개 부위에서 측정하였다(Figure 4). 전극 부착 전 측정 부위의 표면을 알코올로 세척하여 전처리하였다. 전극은 근섬유 방향과 평행하도록 부착하였으며, 전극 부착 위치는 Konrad (2005)의 지침을 참고하였다.

상부승모근은 중량물 취급 중 어깨와 상체의 안정화에 관여하는 근육으로 선정하였고, 척추기립근은 허리 굽힘과 몸통 신전 과정에서 발생하는 요추부 근육부하를 평가하기 위해 선정하였다. 외측광근과 대퇴이두근은 수확상자를 들어 올리고 내려놓는 동안 무릎과 고관절의 굴곡 및 신전 과정에서 발생하는 하지 근육부하를 평가하기 위해 선정하였다.

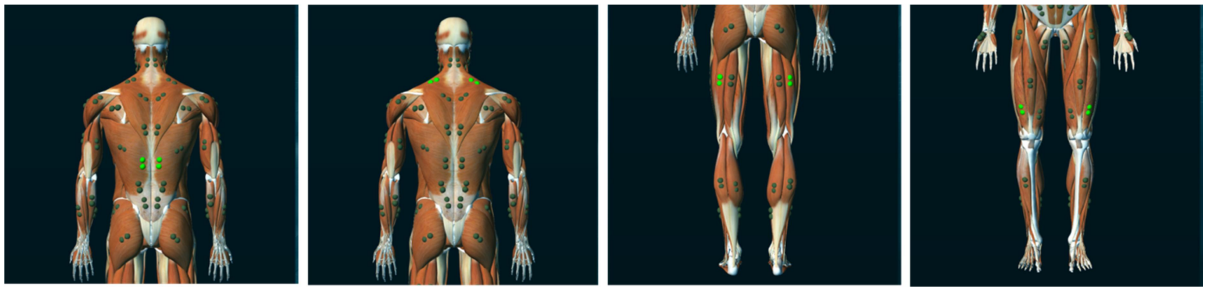


Figure 4. Locations of EMG sensor attachments (ES, UT, BF, VL; Noraxon MR3 3.14.76.)

근전도 신호는 Sampling rate = 1,500Hz로 수집하였으며, 수집된 신호는 filtering, rectification, smoothing 및 amplitude normalization 순으로 처리하였다. 구체적으로, 79-point FIR band-pass filter를 적용하여 20~450Hz 대역으로 필터링한 후 전파정류(full-wave rectification)하였으며, 150ms의 RMS window를 적용하여 평활화하였다. Amplitude normalization에는 각 피험자의 근육에 따른 정규화를 수행하기 위해 각 피험자의 근육별 최대 수의적 수축(Maximum Voluntary Contraction, MVC)과 안정 시 근전도 신호를 측정하였으며, 계산된 %MVC 산출식은 Equation 1과 같다.

$$\%MVC = \frac{RMS_{task} - RM\ rest}{RMS_{MVC} - RMS_{rest}} \times 100 \quad \text{(Equation 1)}$$

(where, RMS_{task}= muscle activity during unit work, RMS_{MVC}= maximum muscle activity, RMG_{rest}= muscle activity at rest)

2.3.3 Subjective assessment

근전도 분석과 함께 웨어러블 슈트 착용에 따른 연구 참여자의 주관적인 신체 부담 변화를 평가하였다. 주관적 평가는 각 작업조건 수행 후 실시하였으며, 웨어러블 슈트 미착용 조건(WO)과 착용 조건(W)에서 연구 참여자가 작업 중 느낀 전신 및 신체 부위별 부담 정도를 평가하도록 하였다. 전신의 불편도는 Borg RPE 척도(6~20점)를 이용하여 평가하였으며, 신체 부위별 국소 불편도는 Borg CR10 척도(0~10점)를 이용하여 허리, 하지 및 어깨·팔 부위에 대해 각각 평가하였다(Borg, 1998). 각 척도의 점수가 높을수록 작업수행 과정에서 연구 참여자가 인지한 신체적 부담 또는 불편도가 큰 것을 의미한다.

또한 웨어러블 슈트 착용에 따른 신체 부담의 변화뿐만 아니라 장비 자체에 대한 사용자의 주관적인 평가를 확인하기 위해 착용 조건(W)에서 만족도 평가를 추가로 실시하였다. 만족도 평가는 전반적 만족도, 작업 시 보조 만족도, 동작 자유도 및 착용감의 4개 항목으로 구성하였으며, 각 항목은 0~7점 척도를 이용하여 평가하였다. 이를 통해 근활성도와 같은 객관적 생체신호의 변화와 함께 연구 참여자가 실제 작업 중 인지하는 신체적 부담과 웨어러블 슈트에 대한 주관적 만족도를 종합적으로 평가하였다.

2.4 Experimental procedure

실험 시작 전 연구 참여자에게 실험의 목적과 전체 절차를 설명한 후 신체적 특성을 측정하였다. 이후 근전도 측정을 위해 각 측정 근육의 피부 표면에 전극을 부착하였으며, 근전도 신호의 정규화를 위해 각 근육에 대한 최대 수의적 수축(Maximum Voluntary Contraction, MVC)을 측정하였다. 각 근육의 MVC 측정 자세와 저항 방향은 Konrad (2005)를 참고하여 설정하였다. 각 자세에서 MVC를 5초 동안 2회 측정하였으며, 반복 사이에는 1분 이상의 충분한 휴식을 제공하였다. 두 반복에서 산출된 값 중 500ms 구간의 가장 높은 평균 RMS 값을 해당 근육의 MVC 기준값으로 사용하였다. 웨어러블 슈트 착용 조건에서는 연구 참여자의 신체 특성에 맞게 장비를 착용하고 고정 위치와 조임 정도를 조절한 후 실험을 실시하였다.

모든 연구 참여자는 웨어러블 슈트 미착용 조건(WO)과 착용 조건(W)에서 Stooping 및 Twisting 작업을 수행하였다. Stooping 작업에

서는 연구 참여자의 정면에 수확상자를 배치하였으며, 상자와 연구 참여자 사이의 거리는 별도의 고정된 거리로 제한하지 않고 각 참여자가 자연스럽게 작업을 수행할 수 있는 위치로 설정하였다. 각 착용 조건에서 동일한 작업을 반복 수행하였으며, 단위 작업은 Lifting, Holding 및 Lowering의 세 동작구간으로 구분하였다.

Twisting 작업은 수확상자를 좌측에서 우측으로 이동하는 조건(LtoR)과 우측에서 좌측으로 이동하는 조건(RtoL)으로 구성하였다. 각 이동 방향에서 상자를 들어 올리고(Lifting), 일정 시간 유지한 후(Holding), 반대편 위치로 내려놓는(Lowering) 일련의 작업을 수행하였다. 분석 시에는 작업방 향에 따른 좌·우 측의 의미를 일관되게 비교하기 위해 상자의 이동이 시작되는 측을 Start-side, 이동이 종료되는 측을 End-side로 구분하였다.

모든 작업수행 과정에서 근전도 신호를 연속적으로 측정하였으며, 수집된 신호는 작업의 동작구간에 따라 구분하여 분석하였다. 또한 각 작업조건 수행 후 전신 및 신체 부위별 주관적 부담을 평가하였으며, 웨어러블 슈트 착용 조건에서는 장비에 대한 만족도 평가를 추가로 실시하였다.

2.5 Statistical analysis

통계분석은 R (version 4.6.0)을 이용하여 수행하였다. 근전도 자료는 MVC로 정규화한 %MVC를 이용하였으며, Stooping과 Twisting 작업을 구분하여 각 근육의 Lifting, Holding 및 Lowering 구간에서 웨어러블 슈트 착용 조건(W)과 미착용 조건(WO)의 차이를 분석하였다. 반복측정 자료의 특성을 고려하여 연구 참여자를 랜덤효과로 설정한 선형혼합모형(linear mixed model)을 적용하였으며, %MVC 값은 분포의 왜도를 고려하여 자연로그 변환 후 분석하였다.

Stooping 작업에서는 좌·우 측의 측정값을 함께 분석하였으며, Twisting 작업에서는 측정 측을 상자 이동의 Start-side와 End-side로 재분류하여 분석하였다. 각 동작구간에서 W와 WO 조건을 비교하였으며, 다중비교에 따른 제1종 오류를 보정하기 위해 Holm 방법을 적용하였다. 근활성도 감소율은 (WO-W)/WO×100으로 산출하였다.

주관적 평가 결과는 Wilcoxon signed-rank test를 이용하여 W와 WO 조건을 비교하였으며, 다중비교에는 Holm 보정을 적용하였다. 착용 조건에서만 측정한 웨어러블 슈트 만족도는 기술통계량을 이용하여 제시하였다. 모든 통계검정의 유의수준은 $\alpha=0.05$로 설정하였다.

3. Results

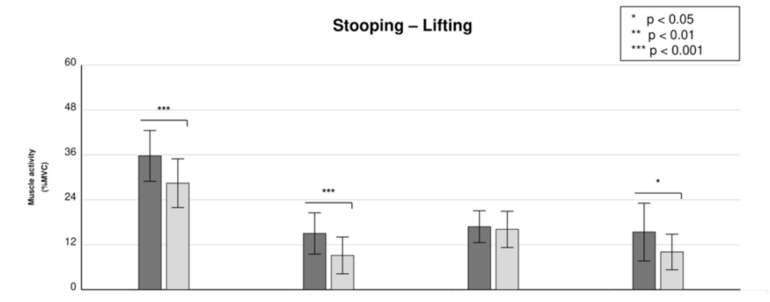
3.1 Participant characteristics

모든 참여자가 W와 WO 조건을 완료하였고, Stooping 2,304개와 Twisting 3,072개의 trial·동작구간·근육별 EMG 관측값에 결측은 없었다.

3.2 Electromyography

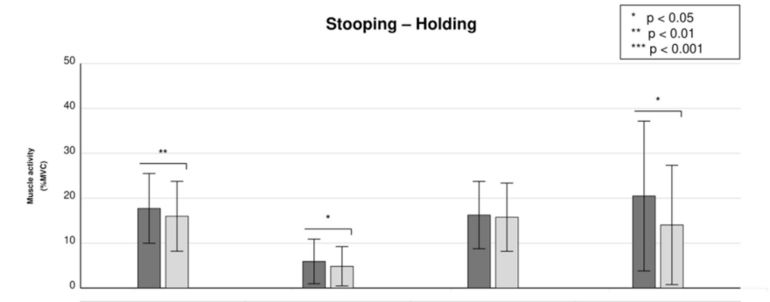
3.2.1 Stooping

Stooping에서는 ES와 VL의 Lifting, Holding 및 Lowering 모두에서 W 조건의 근활성도가 유의하게 낮았다. 감소율은 ES 9.9~20.4%, VL 18.3~39.1%였고, 가장 큰 평균 감소는 VL의 Lifting (39.1%)에서 나타났다. UT는 Lifting (34.6%)과 Holding (31.4%)에서 유의하게 낮았으나 Lowering은 유의하지 않았다. BF는 모든 구간에서 유의한 차이가 없었으며 Lowering의 평균은 W에서 6.1% 높았지만 유의하지 않았다(Figures 5-7, Table 3).



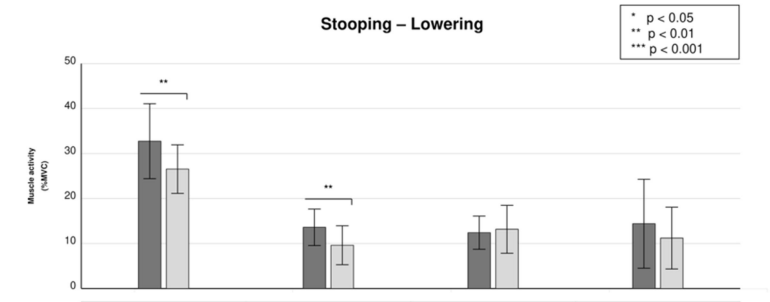
	ES	VL	BF	UT
WO	35.74 (± 6.79)	15.02 (± 5.51)	16.82 (± 4.25)	15.39 (± 7.71)
W	28.44 (± 6.51)	9.15 (± 4.92)	16.10 (± 4.86)	10.07 (± 4.75)
% reduction	20.4%	39.1%	4.3%	34.6%

Figure 5. Muscle activity during Stooping - Lifting (mean ± SD of participant-level means, n=8). Reduction=(WO-W)/WO×100. Stars indicate Holm-adjusted W versus WO contrasts: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001



	ES	VL	BF	UT
WO	17.73 (± 7.76)	5.93 (± 4.97)	16.25 (± 7.50)	20.49 (± 16.67)
W	15.98 (± 7.80)	4.84 (± 4.39)	15.77 (± 7.60)	14.05 (± 13.28)
% reduction	9.9%	18.3%	3.0%	31.4%

Figure 6. Muscle activity during Stooping - Holding (mean ± SD of participant-level means, n=8). Reduction=(WO-W)/WO×100. Stars indicate Holm-adjusted W versus WO contrasts: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

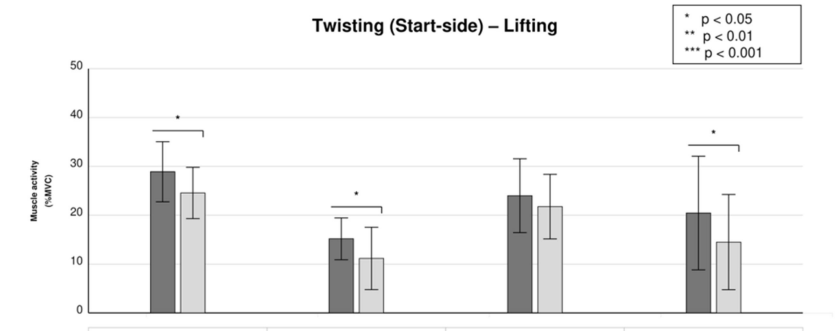


	ES	VL	BF	UT
WO	32.75 (± 8.33)	13.60 (± 4.05)	12.39 (± 3.68)	14.39 (± 9.88)
W	26.54 (± 5.40)	9.61 (± 4.33)	13.15 (± 5.32)	11.20 (± 6.87)
% reduction	19.0%	29.3%	-6.1%	22.2%

Figure 7. Muscle activity during Stooping - Lowering (mean ± SD of participant-level means, n=8). Reduction=(WO-W)/WO×100. Stars indicate Holm-adjusted W versus WO contrasts: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

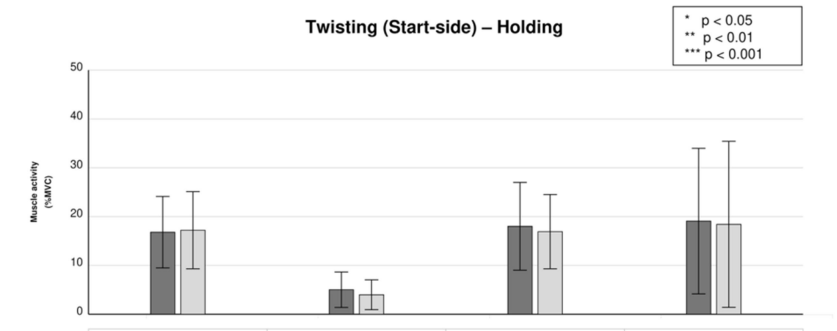
3.2.2 Twisting

Twisting에서는 착용 효과가 상대적 측과 동작구간에 따라 달랐다. Start-side에서 ES는 Lifting과 Lowering에서 각각 15.0%와 15.2% 낮았고, VL과 UT는 Lifting에서 각각 26.5%와 29.1% 낮았다. End-side에서는 ES가 Lifting에서 18.6% 낮았으며, VL은 Lifting, Holding 및 Lowering에서 20.0~22.6% 낮았다. 반면 BF는 Start-side와 End-side의 모든 구간에서 유의한 차이가 없었다. 따라서 Twisting에서도 감소가 관찰되었지만 Stooping처럼 모든 동작구간과 근육에 일률적으로 나타난 것은 아니었다(Figures 8-13, Table 3).



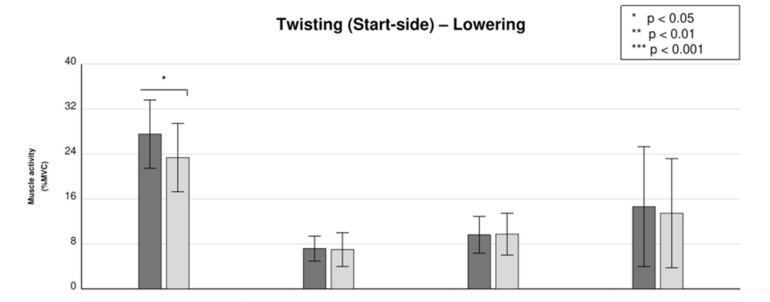
	ES	VL	BF	UT
WO	28.91 (± 6.15)	15.18 (± 4.28)	24.00 (± 7.57)	20.45 (± 11.64)
W	24.56 (± 5.25)	11.16 (± 6.39)	21.77 (± 6.61)	14.50 (± 9.74)
% reduction	15.0%	26.5%	9.3%	29.1%

Figure 8. Muscle activity on the Twisting Start-side - Lifting (mean ± SD of participant-level means, n=8). Reduction=(WO-W)/WO×100. Stars indicate Holm-adjusted W versus WO contrasts: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001



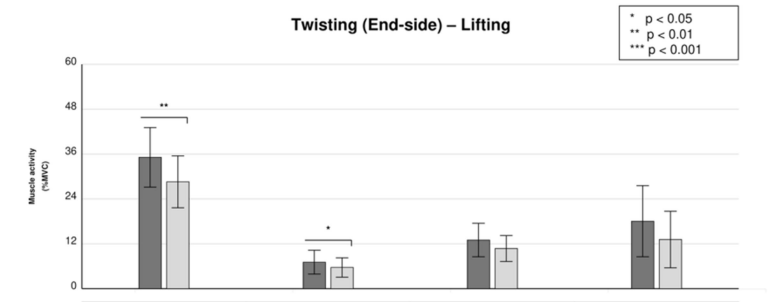
	ES	VL	BF	UT
WO	16.80 (± 7.32)	5.02 (± 3.62)	18.01 (± 8.99)	19.07 (± 14.91)
W	17.20 (± 7.89)	3.99 (± 3.05)	16.92 (± 7.60)	18.41 (± 17.00)
% reduction	-2.4%	20.5%	6.0%	3.5%

Figure 9. Muscle activity on the Twisting Start-side - Holding (mean ± SD of participant-level means, n=8). Reduction=(WO-W)/WO×100. Stars indicate Holm-adjusted W versus WO contrasts: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001



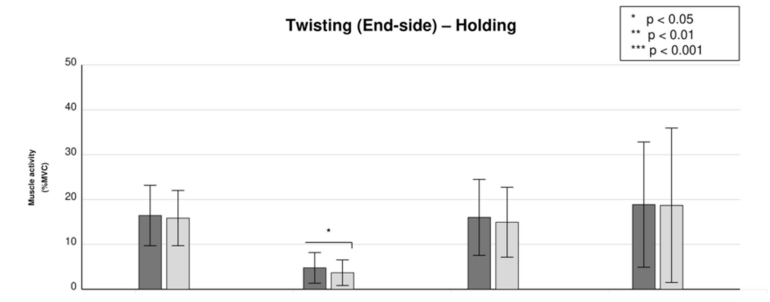
	ES	VL	BF	UT
WO	27.53 (± 6.08)	7.18 (± 2.23)	9.62 (± 3.28)	14.63 (± 10.67)
W	23.35 (± 6.08)	6.99 (± 3.00)	9.75 (± 3.73)	13.47 (± 9.70)
% reduction	15.2%	2.6%	-1.3%	8.0%

Figure 10. Muscle activity on the Twisting Start-side - Lowering (mean ± SD of participant-level means, n=8). Reduction=(WO-W)/WO×100. Stars indicate Holm-adjusted W versus WO contrasts: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001



	ES	VL	BF	UT
WO	35.12 (± 7.96)	7.08 (± 3.19)	13.00 (± 4.48)	18.03 (± 9.51)
W	28.57 (± 6.95)	5.67 (± 2.59)	10.74 (± 3.46)	13.13 (± 7.56)
% reduction	18.6%	20.0%	17.4%	27.2%

Figure 11. Muscle activity on the Twisting End-side - Lifting (mean ± SD of participant-level means, n=8). Reduction=(WO-W)/WO×100. Stars indicate Holm-adjusted W versus WO contrasts: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001



	ES	VL	BF	UT
WO	16.44 (± 6.72)	4.76 (± 3.42)	16.01 (± 8.47)	18.86 (± 13.96)
W	15.86 (± 6.15)	3.69 (± 2.86)	14.93 (± 7.79)	18.70 (± 17.21)
% reduction	3.5%	22.6%	6.7%	0.9%

Figure 12. Muscle activity on the Twisting End-side - Holding (mean ± SD of participant-level means, n=8). Reduction=(WO-W)/WO×100. Stars indicate Holm-adjusted W versus WO contrasts: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

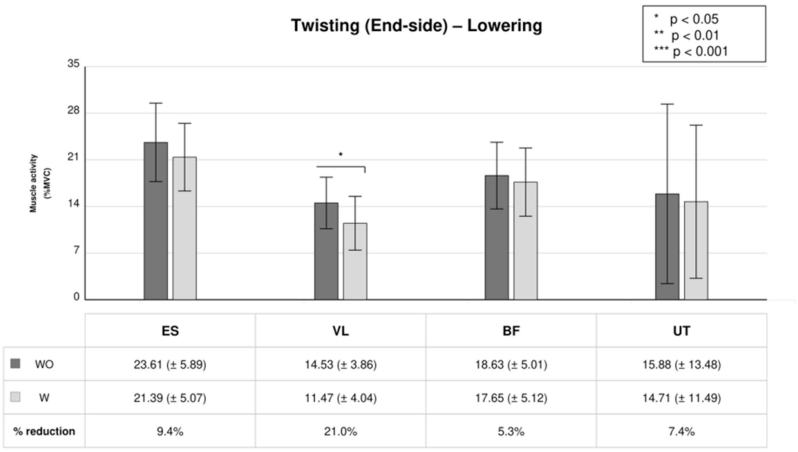


Figure 13. Muscle activity on the Twisting End-side - Lowering (mean ± SD of participant-level means, n=8). Reduction=(WO-W)/WO×100. Stars indicate Holm-adjusted W versus WO contrasts: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

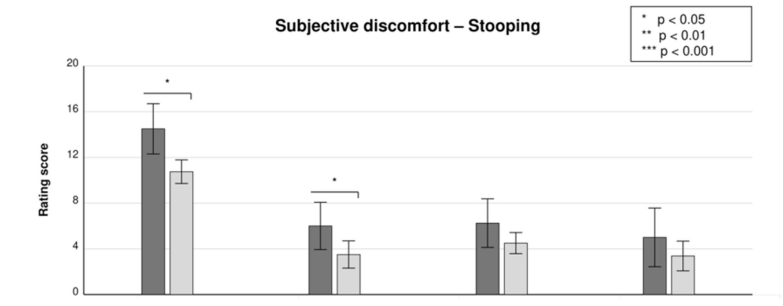
Table 3. Holm-adjusted significant EMG contrasts from the primary LMM analysis

Task	Muscle	Side	Phase	WO mean ± SD	W mean ± SD	Reduction %	Holm p
Stooping	ES	Symmetric	Lifting	35.74±6.79	28.44±6.51	20.4%	0.0008
Stooping	ES	Symmetric	Holding	17.73±7.76	15.98±7.80	9.9%	0.0065
Stooping	ES	Symmetric	Lowering	32.75±8.33	26.54±5.40	19.0%	0.0020
Stooping	VL	Symmetric	Lifting	15.02±5.51	9.15±4.92	39.1%	0.0003
Stooping	VL	Symmetric	Holding	5.93±4.97	4.84±4.39	18.3%	0.0256
Stooping	VL	Symmetric	Lowering	13.60±4.05	9.61±4.33	29.3%	0.0018
Stooping	UT	Symmetric	Lifting	15.39±7.71	10.07±4.75	34.6%	0.0103
Stooping	UT	Symmetric	Holding	20.49±16.67	14.05±13.28	31.4%	0.0145
Twisting	ES	End-side	Lifting	35.12±7.96	28.57±6.95	18.6%	0.0025
Twisting	VL	End-side	Lifting	7.08±3.19	5.67±2.59	20.0%	0.0380
Twisting	VL	End-side	Holding	4.76±3.42	3.69±2.86	22.6%	0.0380
Twisting	VL	End-side	Lowering	14.53±3.86	11.47±4.04	21.0%	0.0361
Twisting	ES	Start-side	Lifting	28.91±6.15	24.56±5.25	15.0%	0.0149
Twisting	ES	Start-side	Lowering	27.53±6.08	23.35±6.08	15.2%	0.0149
Twisting	VL	Start-side	Lifting	15.18±4.28	11.16±6.39	26.5%	0.0116
Twisting	UT	Start-side	Lifting	20.45±11.64	14.50±9.74	29.1%	0.0359

Note. Holm adjustment was applied to Lifting, Holding, and Lowering within each task × muscle × analysis-side family

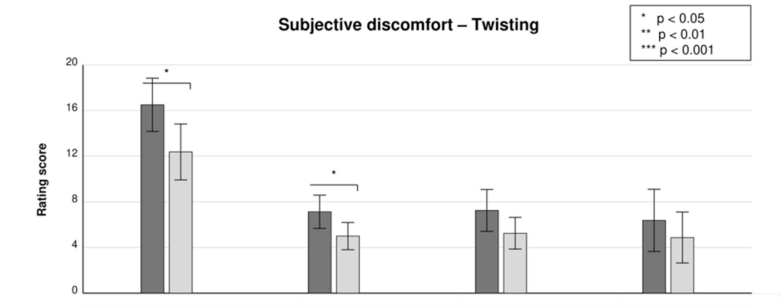
3.3 Subjective evaluation

Stooping에서 전신 불편도는 25.9%, 허리 불편도는 41.7% 감소하였고(Holm 보정 후 유의) Twisting에서도 전신 불편도는 25.0%, 허리 불편도는 29.8% 낮아져 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. 하지와 어깨/팔 불편도는 두 작업 모두에서 평균적으로 낮았으나 Holm



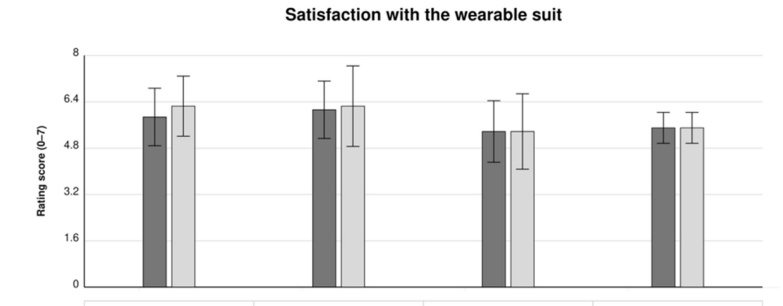
	Whole body	Low back	Lower limb	Shoulder/arm
WO	14.50 (± 2.20)	6.00 (± 2.07)	6.25 (± 2.12)	5.00 (± 2.56)
W	10.75 (± 1.04)	3.50 (± 1.20)	4.50 (± 0.93)	3.38 (± 1.30)
% reduction	25.9%	41.7%	28.0%	32.5%

Figure 14. Subjective discomfort during Stooping (mean ± SD, n=8). Whole-body: Borg RPE 6-20; local regions: Borg CR10 0-10. Stars indicate task-wise Holm-adjusted paired Wilcoxon results: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001



	Whole body	Low back	Lower limb	Shoulder/arm
WO	16.50 (± 2.33)	7.13 (± 1.46)	7.25 (± 1.83)	6.38 (± 2.72)
W	12.38 (± 2.45)	5.00 (± 1.20)	5.25 (± 1.39)	4.88 (± 2.23)
% reduction	25.0%	29.8%	27.6%	23.5%

Figure 15. Subjective discomfort during Twisting (mean ± SD, n=8). Whole-body: Borg RPE 6-20; local regions: Borg CR10 0-10. Stars indicate task-wise Holm-adjusted paired Wilcoxon results: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001



	Overall	Assist	Movement	Comfort
Stooping	5.88 (± 0.99)	6.13 (± 0.99)	5.38 (± 1.06)	5.50 (± 0.53)
Twisting	6.25 (± 1.04)	6.25 (± 1.39)	5.38 (± 1.30)	5.50 (± 0.53)

Figure 16. Satisfaction ratings under the W condition (mean ± SD, n=8; 0-7 scale). Values are descriptive because satisfaction was not recorded under WO

보정 후 유의하지 않았다(Figures 14 and 15). W 조건의 만족도 평균은 Stooping에서 전반적 만족도 5.88, 작업 시 보조 만족도 6.13, 동작 자유도 5.38, 착용감 5.50이었고, Twisting에서는 각각 6.25, 6.25, 5.38 및 5.50이었다. 만족도는 W 조건에서만 측정되었으므로 W-WO 통계검정은 수행하지 않았다(Figure 16).

4. Discussion

본 연구에서는 농작업의 중량물 취급 상황을 모사한 Stooping과 Twisting 작업을 통해 허리보조 웨어러블 슈트의 신체 부담 감소 효과를 평가하였다. 그 결과, 슈트 착용에 따른 근활성도 변화는 작업유형과 근육, 동작구간에 따라 일부 유의하게 나타났다. Stooping에서는 ES와 VL의 근활성도가 Lifting, Holding 및 Lowering의 모든 구간에서 감소하였으며, UT는 Lifting과 Holding에서 감소하였다. Twisting에서도 여러 근육에서 감소가 확인되었으나, 상자의 이동 방향을 기준으로 구분한 Start-side와 End-side에 따라 효과가 나타난 근육과 동작구간에 차이가 있었다. 한편 전신 및 허리의 주관적 불편도는 두 작업 모두에서 감소하였다. 이러한 결과를 종합하면, 본 장비의 보조효과는 모든 작업과 동작에서 동일하게 나타나는 것이 아니라 작업자세와 중량물의 이동 방향, 동작구간 등에 따라 달라질 수 있음을 알 수 있다. 선행연구에서도 여러 패시브형 허리보조 장비의 근활성도 및 주관적 부담 감소 효과는 장비의 구조뿐 아니라 적용되는 작업에 따라 달라질 수 있으며(Mohamed Refai et al., 2024), Lifting, Lowering 및 static holding 등 작업단계와 조건에 따라 패시브형 허리보조 외골격의 근활성도 감소 양상이 다르게 나타날 수 있음이 보고되었다(Ahn et al., 2025).

Stooping에서는 특히 ES의 근활성도가 모든 동작구간에서 일관되게 감소하였다. 이는 몸통을 앞으로 굽힐 때 늘어난 인장스프링의 복원력이 몸통을 펴는 방향으로 작용하면서 척추기립근에 요구되는 힘의 일부를 보조했기 때문으로 판단된다. 초기 PLAD 연구에서도 대칭 들기 작업에서 장비 착용에 따른 척추기립근의 EMG 감소가 보고되었으며(Abdoli-E et al., 2006), 자동차 조립 작업에 PLAD를 적용한 연구(Graham et al., 2009)와 패시브형 소프트 웨어러블 슈트인 HeroWear Apex를 적용한 연구(Goršič et al., 2021)에서도 허리 근활성도가 감소하는 유사한 결과가 나타났다. 본 연구에서 Stooping 시 ES의 근활성도는 비착용 조건보다 9.9~20.4% 감소하였으며, 특히 Lifting과 Lowering에서 상대적으로 큰 감소를 보였다. 따라서 본 슈트는 정면에서 중량물을 들어 올리고 내리는 과정에서 허리 근육의 부담을 줄이는 데 효과가 있는 것으로 판단된다.

Stooping에서 나타난 또 하나의 특징은 VL의 근활성도 감소이다. VL은 세 동작구간에서 모두 감소하였으며, 특히 Lifting에서 39.1% 감소하여 본 연구에서 관찰된 변화 중 가장 큰 감소율을 보였다. 선행연구에서도 허리보조 외골격을 착용한 대칭 및 비대칭 들기 작업에서 허리뿐 아니라 일부 하지 근육의 근활성도가 감소할 수 있음이 보고된 바 있다(Alemi et al., 2019). 다만 본 연구에서 사용한 슈트의 주된 목적이 허리를 보조하는 것이라는 점을 고려하면, VL의 감소를 장비가 하지 근육을 직접 보조한 결과로 해석하기에는 주의가 필요하다. 몸통이 굽혀지면서 발생한 스프링의 장력이 하체 고정부까지 전달되고, 이 과정에서 몸통과 고관절, 무릎을 사용하는 작업자세나 힘의 분배가 달라졌을 가능성이 있다. 서로 다른 패시브형 허리보조 외골격을 대칭 및 비대칭 들기에 적용했을 때 장비에 따라 근활동과 작업자세의 변화가 다르게 나타났다는 Madinei et al. (2020)의 결과도 이러한 가능성을 뒷받침한다. 또한 본 연구에서는 BF에서 유의한 변화가 나타나지 않았으므로, 슈트 착용이 모든 하지 근육의 부담을 동일하게 감소시켰다고 보기는 어렵다.

Twisting에서도 슈트 착용에 따른 근활성도 감소가 확인되었지만 Stooping에 비해서는 그 양상이 복잡하게 나타났다. 본 연구에서는 절대적인 좌·우 방향보다 중량물 이동과의 관계를 명확하게 보기 위해 상자가 출발하는 측을 Start-side, 도착하는 측을 End-side로 구분하였다. 그 결과 Start-side에서는 ES의 Lifting과 Lowering, VL과 UT의 Lifting에서 근활성도가 감소하였으며, End-side에서는 ES의 Lifting과 VL의 Lifting, Holding 및 Lowering에서 감소가 나타났다. 이는 비대칭 들기 작업에서도 PLAD가 요추 모멘트와 척추기립근의 근활성도를 낮출 수 있다고 보고한 Abdoli-E and Stevenson (2008)의 연구와 전반적으로 같은 방향의 결과이다. 다만 본 연구에서는 감소가 모든 근육과 동작구간에서 일관되게 나타나지는 않았다. Twisting은 몸통의 굽힘뿐 아니라 회전과 좌우 체중이동이 함께 발생하기 때문에, 주로 몸통을 펴는 방향으로 작용하는 슈트의 보조력이 작업 전 과정에서 동일하게 작용하기는 어려웠을 것으로 보인다. 또한 Start-side와 End-side에서 효과가 나타난 근육과 동작구간이 서로 달랐다는 점은 비대칭 중량물 작업을 평가할 때 단순히 좌·우 근육의 평균만을 비교하기보다 중량물의 이동 방향을 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다.

근활성도뿐 아니라 참여자가 느낀 주관적 부담에서도 슈트 착용에 따른 긍정적인 변화가 나타났다. 전신 및 허리 불편도는 Stooping과 Twisting 모두에서 유의하게 감소하였으며, 이는 실제 참여자들도 작업 중 슈트의 보조효과를 체감했음을 보여준다. 특히 근활성도

의 감소와 주관적 불편도의 감소가 대체로 같은 방향으로 나타났다는 점은 본 장비의 효과를 해석하는 데 의미가 있다. 착용형 보조장비 연구에서는 객관적인 근활성도와 작업자가 느끼는 부담이 항상 같은 방향으로 변화하는 것은 아니기 때문이다. 실제로 소프트형과 강성형의 두 패시브형 외골격을 이용한 반복 들기 작업에서 불편도와 에너지 소비는 감소하였지만 몸통 EMG에는 유의한 변화가 나타나지 않은 사례도 보고되었다(Voß et al., 2026). 또한 실제 농작업을 대상으로 한 Thamsuwan et al. (2020)의 연구에서는 패시브형 허리보조 외골격(Laevo V2.5) 착용 시 일부 작업에서 허리 근육의 부하가 감소하였지만, 표준화된 작업에서는 일부 참여자의 근활동이 증가하는 경우도 관찰되었다. 따라서 본 연구에서 나타난 평균적인 감소 효과뿐 아니라 작업조건이나 개인에 따라 보조효과가 달라질 가능성도 함께 고려할 필요가 있다.

허리보조 장비를 평가할 때에는 허리의 부담이 감소하는 것뿐 아니라 그 부담이 다른 신체 부위로 옮겨가는지도 중요하게 살펴봐야 한다. 본 연구에서는 BF의 근활성도가 유의하게 증가하지 않았으며, 하지 및 어깨·팔의 주관적 불편도에서도 유의한 증가가 나타나지 않았다. 따라서 적어도 본 연구에서 수행한 단시간의 Stooping과 Twisting 작업에서는 슈트 착용으로 인해 다른 신체 부위의 부담이 뚜렷하게 증가했다고 볼 만한 결과는 확인되지 않았다. 다만 Stooping의 BF Lowering에서는 착용 시 평균 근활성도가 6.1% 높았으며, Twisting의 Start-side에서도 ES Holding과 BF Lowering에서 각각 2.4%와 1.3% 높은 값이 나타났다. 이러한 차이는 통계적으로 유의하지 않았지만, 이를 근거로 다른 부위로의 부담 전이가 전혀 없다고 단정하기는 어렵다. 실제로 허리보조 외골격은 작업조건에 따라 무릎 관절의 부하를 증가시킬 가능성이 보고된 바 있으며(Bär et al., 2022), 일부 패시브형 외골격 및 웨어러블 슈트에서는 움직임의 자유도나 사용 편의성이 저하될 수 있기에 장비 적용 시 고려해야 할 요인으로 제시되었다(Bosch et al., 2016; Baltrusch et al., 2018; Ali et al., 2021). 따라서 향후 장시간 작업이나 다양한 자세에서 장비를 사용할 경우에는 허리 근육뿐 아니라 하지와 상지의 부담, 움직임의 불편함 등을 함께 평가할 필요가 있다.

이러한 결과는 농업 현장에서 반복적으로 이루어지는 중량물 취급 작업에 적용한다는 측면에서도 의미가 있다. 농업에서는 수확상자나 비료포대, 각종 농자재 등을 바닥이나 낮은 위치에서 들어 올리고 내려놓는 작업이 빈번하게 발생한다. 본 연구의 Stooping에서 ES와 VL의 근활성도가 여러 동작구간에 걸쳐 비교적 일관되게 감소했다는 점을 고려하면, 이와 유사한 작업에서 본 슈트가 작업자의 신체 부담을 줄이는 데 활용될 가능성이 있다. 다만 실제 농작업은 실험실과 달리 불균일한 지면에서의 이동, 쪼그림, 몸통 회전 등의 동작이 연속적으로 이루어지며 작업환경도 일정하지 않다. 또한 장기간 외골격을 농업 현장에서 착용할 경우 불편감이나 열 스트레스, 체감되는 보조효과의 부족 등이 지속적인 사용을 어렵게 하는 요인이 될 수 있다(Jakob et al., 2023). 따라서 실험실에서 확인된 근활성도 감소가 실제 농작업에서도 동일하게 나타나는지는 추가적인 현장 검증이 필요하다. 향후 농업 현장에 장비를 적용할 때에는 작업별 신체 부담 감소 효과와 함께 착탈의 편의성, 이동성, 열 및 압박감, 작업 간 전환, 작업수행 및 생산성 등을 종합적으로 평가해야 할 것이다.

본 연구에는 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 연구 참여자가 건강한 성인 남성 8명으로 제한되어 있어 성별, 연령, 체형 및 농작업 숙련도에 따른 차이를 확인하지 못하였다. 따라서 본 연구 결과를 여성, 고령자 및 다양한 신체 특성을 가진 실제 농업인에게 일반화하는 데에는 제한이 있다. 둘째, 20kg의 상자를 이용하여 단시간 동안 수행한 실험실 과제를 대상으로 하였기 때문에 장시간 작업에 따른 피로와 실제 농업인의 작업전략, 농작업 현장의 다양한 환경조건을 충분히 반영하지 못하였다. 향후에는 성별과 연령 등을 다양하게 구성한 실제 농업인 표본을 확대하고, 장시간의 현장 교차시험을 통해 본 장비의 효과를 검증할 필요가 있다. 또한 근활성도와 주관적 평가뿐 아니라 작업자세와 운동학적 변화, 관절 모멘트, 대사 부담 및 장시간 착용에 대한 수용성을 함께 평가한다면 허리보조 웨어러블 슈트의 농작업 적용 가능성을 보다 종합적으로 판단할 수 있을 것이다.

5. Conclusion

본 연구는 20kg 수확상자 취급 작업에서 패시브형 허리보조 웨어러블 슈트의 신체 부담 감소 효과를 반복측정 자료로 평가하였다. Stooping에서는 ES와 VL이 Lifting, Holding 및 Lowering 전 구간에서 감소하였고, 특히 VL Lifting에서 39.1%의 가장 큰 평균 감소가 나타났다. Twisting에서도 ES, VL 및 UT의 일부 비교에서 유의한 감소가 확인되었으나 Start-side/End-side와 동작구간에 따라 결과가 달랐다. 전신 및 허리 불편도는 두 작업 모두에서 낮아져 EMG 결과를 보완하였다. 반면 BF와 측정된 다른 신체 부위에서 통계적으로 유의한 부담 증가가 확인되지는 않았지만, n=8의 소표본으로 부담 전이를 배제할 수는 없다. 따라서 본 장비는 건강한 성인 남성을 대상으로 한 단시간의 실험실 모사 작업에서 반복적인 Stooping 및 특정 Twisting 구간의 신체 부담을 줄일 가능성을 보였으며, 실제

농업인과 장시간 현장 작업을 대상으로 효과의 지속성, 작업별 적합성 및 착용 수용성을 추가로 검증할 필요가 있다.

Acknowledgements

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2022-RD010384)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

This study was supported by (2026) the RDA Fellowship Program of National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

Abdoli-E, M., Agnew, M.J. and Stevenson, J.M., An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks, *Clinical Biomechanics*, 21(5), 456-465, 2006.

Abdoli-E, M. and Stevenson, J.M., The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting, *Clinical Biomechanics*, 23(3), 372-380, 2008.

Ahn, J., Jung, H., Moon, J., Kwon, C. and Ahn, J., A comprehensive assessment of a passive back support exoskeleton for load handling assistance, *Scientific Reports*, 15, 3926, 2025.

Alemi, M.M., Geissinger, J., Simon, A.A., Chang, S.E. and Asbeck, A.T., A passive exoskeleton reduces peak and mean EMG during symmetric and asymmetric lifting, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 47, 25-34, 2019.

Ali, A., Fontanari, V., Schmoelz, W. and Agrawal, S.K., Systematic Review of Back-Support Exoskeletons and Soft Robotic Suits, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 765257, 2021.

Bär, M., Luger, T., Seibt, R., Gabriel, J., Rieger, M.A. and Steinhilber, B., Effects of a Passive Back-Support Exoskeleton on Knee Joint Loading during Simulated Static Sorting and Dynamic Lifting Tasks, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 9965, 2022.

Baltrusch, S.J., van Dieën, J.H., van Bennekom, C.A.M. and Houdijk, H., The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals, *Applied Ergonomics*, 72, 94-106, 2018.

Borg, G.A., *Borg's perceived exertion and pain scales*, Human Kinetics, Champaign, IL, 1998.

Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K. and de Looze, M.P., The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work, *Applied Ergonomics*, 54, 212-217, 2016.

Fathallah, F.A., Musculoskeletal disorders in labor-intensive agriculture, *Applied Ergonomics*, 41(6), 738-743, 2010.

Goršič, M., Song, Y., Dai, B. and Novak, D., Evaluation of the HeroWear Apex back-assist exosuit during multiple brief tasks, *Journal of Biomechanics*, 126, 110620, 2021.

Graham, R.B., Agnew, M.J. and Stevenson, J.M., Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands

during an automotive assembly task: Assessment of EMG response and user acceptability, *Applied Ergonomics*, 40(5), 936-942, 2009.

Jakob, M., Balaguier, R., Park, H. and Trask, C., Addressing Exoskeleton Implementation Challenges: Case Studies of Non-Acceptance in Agriculture, *Journal of Agromedicine*, 28(4), 784-796, 2023.

KATS (Korean Agency for Technology and Standards), The 8th Korean Anthropometric Survey: Final Report, 2021, https://sizekorea.kr/human-info/meas-report?measDegree=8 (retrieved August 5, 2026).

Kee, D. and Haslam, R., Prevalence of work-related musculoskeletal disorders in agriculture workers in Korea and preventative interventions, *Work*, 64(4), 763-775, 2019.

Kim, K.S., Kim, K.R., Kim, H.C. and Lee, K.S., Risk Assessment and Symptoms of Musculoskeletal Disorders in Melon Farm Workers, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 16(4), 385-397, 2006.

Konrad, P., *The ABC of EMG: A Practical Introduction to Kinesiological Electromyography*, Noraxon Inc., Scottsdale, AZ, USA, 2005.

Madinei, S., Alemi, M.M., Kim, S., Srinivasan, D. and Nussbaum, M.A., Biomechanical assessment of two back-support exoskeletons in symmetric and asymmetric repetitive lifting with moderate postural demands, *Applied Ergonomics*, 88, 103156, 2020.

Marras, W.S., Lavender, S.A., Leurgans, S.E., Fathallah, F.A., Ferguson, S.A., Allread, W.G. and Rajulu, S.L., Biomechanical risk factors for occupationally related low back disorders, *Ergonomics*, 38(2), 377-410, 1995.

Mohamed Refai, M.I., Moya-Esteban, A., van Zijl, L., van der Kooij, H. and Sartori, M., Benchmarking commercially available soft and rigid passive back exoskeletons for an industrial workplace, *Wearable Technologies*, 5, e6, 2024.

NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), Revised NIOSH Lifting Equation, 2024, https://www.cdc.gov/niosh/ergonomics/about/RNLE.html (retrieved August 5, 2026).

RDA (Rural Development Administration), Higher prevalence among female and older farmers, with musculoskeletal disorders being most common, 2025, https://www.rda.go.kr/board/board.do?dataNo=100000802152&mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry (retrieved August 5, 2026).

Statistics Korea, Agriculture, Forestry and Fishery Survey in 2024, 2025, https://sri.kostat.go.kr/board.es?act=view&bid=11709&list_no=437337&mid=a20101000000 (retrieved August 5, 2026).

Thamsuwan, O., Milosavljevic, S., Srinivasan, D. and Trask, C., Potential exoskeleton uses for reducing low back muscular activity during farm tasks, *American Journal of Industrial Medicine*, 63(11), 1017-1028, 2020.

Voß, J., Deicke, J., Laufs, U., Pökel, C., Schlosser, C., Schuhte, M., Kramer, M., Ueberschär, O. and Falz, R., Physiological and perceptual effects of two passive back-support exoskeletons during repetitive lifting in healthy adults, *European Journal of Applied Physiology*, 126, 3289-3302, 2026.

WHO (World Health Organization), Low back pain, 2023, https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/low-back-pain (retrieved August 5, 2026).

Author listings

Sang-soo Park: qkrtkdtn53@korea.kr
Highest degree: M.S., Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Position title: Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, RDA
Areas of interest: Work-related Musculoskeletal Disorders, Physical ergonomics, Occupational safety and Health Management, Exoskeleton, Exosuit

Hyocher Kim: hyocher@gmail.com
Highest degree: PhD, School of Public Health and Clinical Nutrition, University of eastern Finland
Position title: Professor, Department of Liberal Arts, Korea National University of Agriculture and Fisheries
Areas of interest: Occupational health and safety in agriculture

Hyeseon Chae: hyeseon@korea.kr
Highest degree: MS, Department of Clothing Textile, Yeungnam University
Position title: Senior Researcher, Department of Liberal Arts, Korea National University of Agriculture and Fisheries
Areas of interest: Agriculture, Agricultural safety & health

Insoo Kim: ergonomist@korea.kr
Highest degree: Ph.D., Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University
Position title: Junior Researcher, Department of Agricultural Engineering, RDA
Areas of interest: Ergonomics, HCI

Sooin Park: sooinpark@korea.kr
Highest degree: B.S., Department of Electronic Engineering, Konkuk University
Position title: Junior Researcher, Department of Agricultural Engineering, RDA
Areas of interest: Electronic Engineering, Ergonomic Tools Design

Mintae Seo: mtseo85@korea.kr
Highest degree: M.S., Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Position title: Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, RDA
Areas of interest: Physical Ergonomics, Occupational Safety and Health Management, Occupational Disease