

짐 운반능력을 향상시키기 위한 수동 상지 외골격장치(H-Frame) 개발

Development of Passive Upper Limb Exoskeleton Device (H-Frame) for Augment the Load Carrying Capability of the Human

정동현^{1,#}, 강도연¹, 이지석¹
Dong-Hyun Jeong^{1,#}, Do Yeon Kang¹, and Ji Seck Lee¹

¹ 현대로템 로봇개발팀 (Robot Development Team, Hyundai Rotem)
Corresponding Author / E-mail: donghei@hyundai-rotem.co.kr, TEL: +82-31-596-9660
ORCID: 0000-0003-3988-4723

KEYWORDS: Exoskeleton device (외골격 장치), Passive upper limb (수동식 상지), Metabolic (호흡가스분석), Electromyography (근전도), Compression force sensor (압박력 센서), Load cell (로드셀)

Carrying heavy objects in agricultural and industrial sites is the most basic labor, which requires a lot of energy. Many equipment such as crane, chain block, elevator, and forklift truck has been developed to reduce human power. Nevertheless, many tasks require human labor. In addition, rapid aging is increasing musculoskeletal diseases in industrial workers. Consequently, various muscle auxiliary wear robots and devices are being developed. In this study; a passive upper limbs exoskeleton (H-Frame) was developed to help carry over 20 kg of weight in industrial and agricultural sites. For the functional test of the developed H-Frame, tests were carried out for 20, 30, and 40 kg of each box. To measure the objective and numerical data of the H-Frame, various sensor values such as EMG (Electromyography), harness compression force sensor, and load cell value of side support and rope were measured. EMG and metabolic experiments were also performed on 8 subjects before and after wearing the device. The average value of the upper extremity muscle showed a 44% reduction effect after wearing. The device helped the wearer when carrying heavy objects. It could help prevent musculoskeletal diseases in industrial and agricultural fields.

Manuscript received: September 26, 2022 / Revised: December 2, 2022 / Accepted: December 16, 2022

1. 서론

농업 및 산업현장에서 무거운 물건을 들고 운반하는 작업은 가장 기본적인 노동으로 많은 인력이 필요로 한다. 이러한 인력소모를 줄이기 위해 거중기, 승강기, 지게차와 같은 많은 장비들이 개발되었다. 그럼에도 불구하고 아직 중장비 도입이 어려운 환경에서는 사람이 직접 운반해야 하는 작업들이 많다. 그리고 급속도로 진행되는 고령화로 인해 산업현장 노동자들의 근골격계 질환이 증가하고 있다[1]. 근골격계 질환을 예방하기 위하여 다양한 근력보조 착용로봇 및 장치들이 많이 개발되고 있다.

하반신형 외골격 착용로봇으로 UC Berkeley 대학에서 개발된 Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) [2]는 유압식

착용로봇으로 착용자가 34 kg의 무게를 등에 매고 약 1.3 m/s의 속도로 보행이 가능하다. 하지만 동력원으로 유압파워팩이 필요하다. 현대자동차그룹에서 개발된 Human Universal Mobility Assist (HUMA) [3]는 전기식 착용로봇으로 다중링크 구조의 생물학적 무릎관절 설계를 통하여 20 kg의 무게를 매고 약 2.7 m/s의 속도로 달리기 가능하다. 대우조선해양에서 개발된 Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Hydraulic Wearable Robot (DSME HWR) [4]은 무릎관절에 유압실린더와 스프링구조를 이용하여 무릎각도 0-120° 구간에서 중량물 35 kg을 들어 올릴 수 있다. 유압식이지만 배터리를 이용하여 독립적 구동이 가능하다. 현대로템에서 개발된 Human Universal Mobility Assist-Hybrid (HUMA-H) [5]는 무릎관절에 큰 힘을 낼 수 있도록 단동 다단실린더를 적용하여 무릎관절의 전회전구간에서 높은

토크를 가지도록 설계하였고, 허리관절에는 전기모터 구동기를 사용하여 앞뒤 방향에 대한 균형을 잡을 수 있도록 설계 제작하였다. 전기 및 유압 동력원을 복합적으로 사용하여 20 kg의 무게를 매고 1.1 m/s의 속도로 보행이 가능하다. 하지형 착용로봇의 경우 대부분 짐을 등에 매고 운반하는 형태로 시스템이 매우 복잡하며 착용자의 보행의도파악의 문제시 전도의 큰 위험성을 가진다. 당장 산업현장에 사용하기에는 많은 비용과 개선점들이 필요하다.

상반신형 외골격 장치로 Ekso-BIONICS에서 개발된 EksoVest [6]는 수동식 상체 외골격으로 스택 링크 구조는 전체동작범위에서 사용자의 팔과 팔꿈치를 매끄럽게 따라가며 반복적인 움직임에 불편함이 없고 가스스프링으로 오버헤드에서 사용자가 짊어진 하중을 부분적으로 지지함으로 작업자의 부하와 피로도를 줄여준다. 오버헤드 작업을 시뮬레이션 하여 EksoVest의 성능을 평가한 결과 오버헤드 드릴링 작업 중 척추 하중이 약 30% 정도 줄어든 결과를 얻었다[7]. Levitate Technologies에서 개발된 AIRFRAME [8]은 스프링력을 이용하여 팔의 무게를 어깨, 목, 등 상부에서 엉덩이 바깥쪽으로 전달하여 에너지를 고르게 분산시켜 근육 스트레스를 줄인다[9]. COMAU에서 개발된 MATE-XT [10] 또한 스프링력을 이용한 상지 지지 착용로봇으로 Proto-MATE를 사용하면 상지 근육의 근전도(Electromyography, EMG)를 최대 43%까지 줄일 수 있다[11]. Ottobock에서 개발된 Paexo Shoulder [12]는 2 kg 미만의 가벼운 무게와 생체역학적 디자인으로 모든 상황에서 움직임의 완전한 자유와 빠른 착용 및 탈의를 보장하며 어깨 근육과 관절에 가해지는 스트레스를 40% 이상 줄여준다[13]. 이와 같은 상체형 외골격 장치는 팔의 무게를 받쳐 줌으로 어깨의 부하를 줄여 주는 효과가 있다. 전기구동기 없는 스프링과 같은 탄성체를 이용한 수동식 장치로 이루어져 상용화가 되어 산업현장에 적용되어지고 있다. 하지만 20 kg 이상의 무거운 중량물을 들고 운반하는 작업에는 큰 도움을 줄 수 없다.

수동식 허리보조 외골격 장치로 Laevo-Exoskeletons에서 개발된 Laevo [14]는 가슴, 허리, 허벅지 3지점에 체결이 되며 허리를 구부리는 동안 탄성 빔과 스프링 하중 조인트로 인해 가슴과 다리에 저항이 가해져 등 근육 모멘트와 평행한 모멘트를 생성한다. 장치 착용 전과 후를 비교하여 등 근육 활동의 상당한 감소(11-57%)가 되었다[15]. SuitX에서 개발된 backX [16]는 보행 시에는 작동하지 않아 저항이 없고 착용자가 허리 굽힘 동작에서만 가스 스프링이 압축되어 적절한 양의 지지 토크가 발생된다. 앞으로 구부리는 자세를 유지한 남성과 여성 대상에서 척추근의 평균 근육 활동이 장치 착용 전과 후 각각 75% 및 56% 감소하였다[17]. 탄성체를 적용하여 기구적으로 허리 굽힘 동작에서 도움을 줄 수 있는 수동식 허리보조장치이다. 하지만 상체의 무게를 지지 해줄 수 있는 정도의 지지력이며 산업안전보건공단에서 지양하는 허리 굽혀 들기(Stooped Lift) 자세에서의 지원 장치라 볼 수 있다. 산업안전보건공단에서는 다리근육이 허리근육보다 강하기 때문에 쪼그려 앉아 들기(Squat Lift)

자세를 취할 경우 허리근력 부하가 감소되어 부상을 예방할 수 있다[18].

본 논문에서는 무거운 중량물을 들고 운반하는 작업에 도움을 줄 수 있는 수동형 상지 외골격장치(H-Frame)를 개발하였다. Fig. 1과 같이 상체에 착용하는 형태로 기능실험과 효과실험을 통하여 본 개발품의 성능을 평가하였다. 기능실험으로는 착용자의 상지 근육의 근전도 비교와 압박센서를 활용한 착용압박감을 측정 비교하였다. 그리고 효과실험으로 호흡가스분석 실험을 통해 정량적 성능검증을 실시하였다.

2. 수동형 상지 외골격장치 설계 및 기능실험

2.1 수동형 상지 외골격장치(H-Frame) 설계

산업현장에서 20 kg 중량물을 들고 운반하는 작업에 도움을 줄 수 있는 수동형 상지 외골격장치를 개발하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발된 H-Frame의 주요 구성 품을 보여 준다. 장치의 전체 크기는 너비 350 mm, 높이 700 mm, 깊이 260 mm로, 사람이 착용했을 때 어깨, 허리 그리고 허벅지 벨트로 체결이 된다. 프레임은 경량화를 위해 알루미늄으로 제작하였으며 J바와 측면 지지대로 구성되어 있다. 어깨와 허리는 QR 레버를 이용하여 손쉽게 착용자의 신체에 맞게 길이조절 가능하도록 하다. 전체 무게는 그리퍼 포함하여 약 2 kg이며 로프를 이용하여 로프의 길이조절 가능하다. 작업 대상물에 따라 적합한 그리퍼로 교체 가능하다.

Fig. 2는 H-Frame의 착용 모습을 보여준다. 착용자의 신체에 맞게 J바의 높이를 조절하여 착용한다. 어깨로부터 5-10 cm 이상이 적당하다. 그리고 로프의 길이는 로프를 이용하여 양팔을 폈을 때 보다 로프의 길이를 짧게 줄여 조절한다. 로프는 하나로 연결되어 한 팔을 접게 되면 다른 한 팔은 자유롭게 움직일 수 있다.

2.2 수동형 상지 외골격장치 작동 원리

현실적으로 무거운 물건을 들기 위한 자세로는 허리와 무릎을 굽혀 물건을 잡고 들어 올리게 된다. Fig. 3과 같이 장치를 입지 않고 물건을 들게 되면 중량물의 무게는 상지 힘(F_A)을 통해 몸으로 전달되어 허리 회전력(T_W)과 다리 힘(F_L)으로 들게 된다. 장치를 착용하고 물건을 들게 되면 중량물의 무게는 상지 힘(F_A)과 로프의 장력(F_R)으로 분산되며 로프로 전달된 무게는 프레임을 통해 측면지지대(F_B)와 어깨(F_S), 허리(F_W) 하네스로 힘이 분산된다. 따라서 장치를 착용하게 되면 상지의 힘이 보다 적게 사용된다.

● 중량물 무게(Without H-Frame) = 상지 힘(F_A) + 허리 회전력(T_W) + 다리 힘(F_L)

● 중량물 무게(With H-Frame) = 상지 힘(F_A) + 로프 장력(F_R) + 측면지지대힘(F_B) + 어깨 압박력(F_S) + 허리 압박력(F_W) + 허리 회전력(T_W) + 다리 힘(F_L)



Fig. 1 Elements of the H-Frame

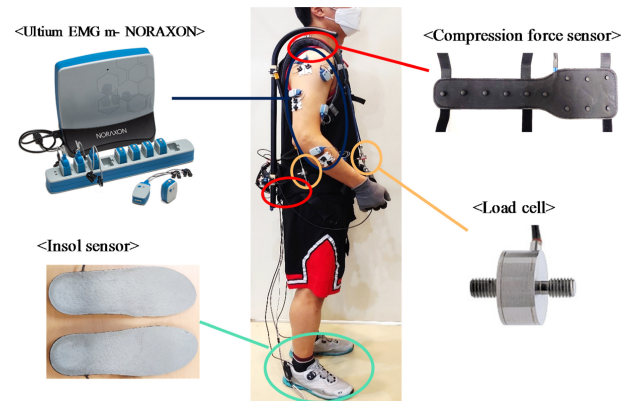
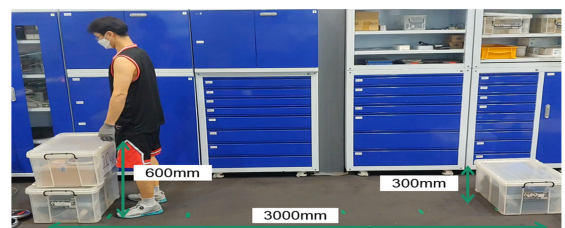


Fig. 4 Measuring devices for functional experiment



Fig. 2 How to wear the H-Frame



(a) Experimental setup



(b) Without H-Frame

(c) With H-Frame

Fig. 5 Functional experiment of the H-Frame

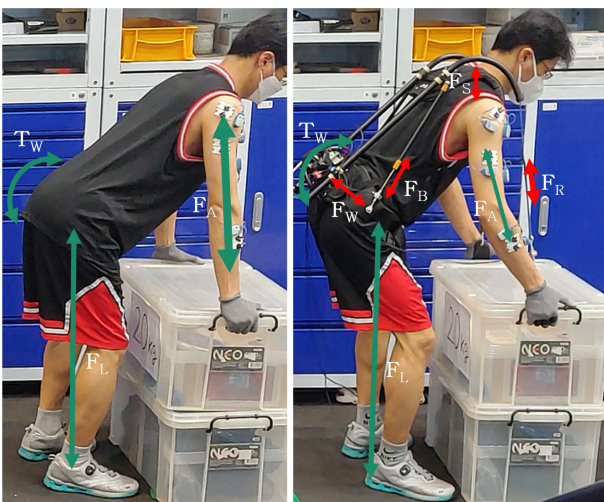


Fig. 3 Comparison of forces acting on the H-Frame

2.3 수동형 상지 외골격장치 기능실험

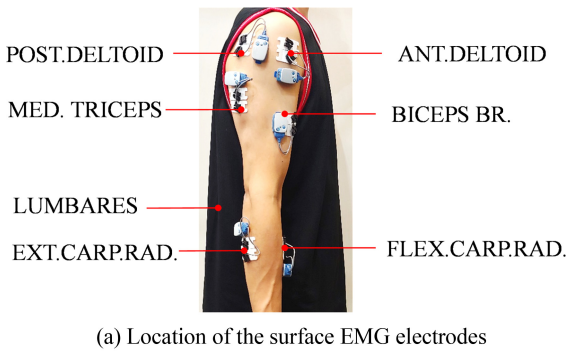
사람이 착용을 하는 외골격 장치의 경우 착용자의 장치 사용 숙련도에 따라 결과에 큰 영향을 끼친다. 본 기능실험에서는 장치의 이해도가 높고, 3개월 이내 근골격계 질환 없는 건강한 성인 남성 피험자(나이: 39세, 체중: 67 kg, 키: 175 cm)가 실험에 참가하였다. 정량적 측정을 위해 근전도센서, 압박력센서, 인솔 센서, 로드셀을 Fig. 4와 같이 장착하였다. 오른쪽 상지와 허리에 근전도를 측정하기 위해 센서를 붙이고 어깨와 허리 하네스의 압박력을 측정하기 위해 압박센서를 장착하였다. 그리고 로프의

2.4 수동형 상지 외골격장치 기능실험 결과

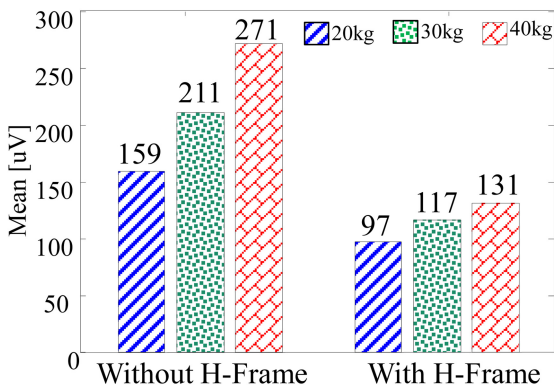
기능실험결과와 표면 근전도 측정값, 로프와 측면 지지대의 로드셀 측정값, 어깨와 허리 하네스 압박력 측정값에 대하여 각각 분석한다.

먼저 근활도를 측정하기 위해 NORAXON 사 Ultium EMGm 을 Fig. 6(a)와 같이 오른쪽 상지와 허리에 위치하는 수근굴근, 수근신근, 상완이두근, 상완삼두근, 전면삼각근, 후면삼각근, 요추근 7곳의 표면 근전도를 측정하였다. 샘플링 속도: 2,000 samples/s, 대역 필터: 20-400 Hz이다. 상자의 무게가 증가함에

장력과 측면지지대의 힘을 측정하기 위해 로드셀을 장착하였다. 끝으로 착용자의 보행을 파악하기 위해 인솔센서를 삽입하여 측정하였다. 기능실험으로 물건운반 동작실험을 수행하였다. Fig. 5(a)와 같이 지면으로부터 300 mm 높이의 상자(400 × 600 × 300 mm)를 들고 3 m 이동 후 내려놓기 동작으로 4회 반복 측정하였다. 그리고 상자의 무게를 20, 30, 40 kg에 대해서 각각 장치를 착용 전과 후에 대해서 반복 실험 측정하였다. Fig. 5(b)는 장치를 착용하지 않고 중량물을 옮기는 실험이고 Fig. 5(c)는 장치를 착용하고 중량물을 옮기는 실험을 수행하였다.



(a) Location of the surface EMG electrodes



(b) The averaged EMG amplitudes of biceps

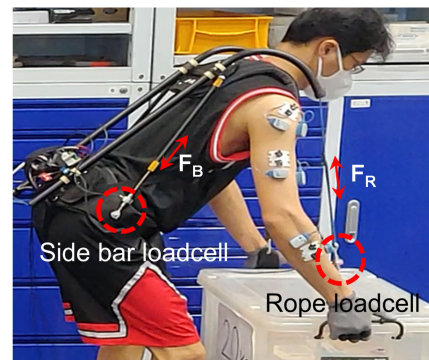
Fig. 6 Results of EMG measurement experiments

근전도 값이 증가하였으며 H-Frame 장치를 착용 시 높은 감소를 확인할 수 있다. 전체 근전도 평균 값이 20 kg 운반 시 37%, 30 kg 운반 시 32%, 40 kg 운반 시 41% 장치를 착용 시 감소효과를 보였다. 특히, 중량물을 들 때 가장 큰 힘이 필요한 상완이두근의 경우 Fig. 6(b)와 같은 결과를 얻었으며 20 kg 운반 시 39%, 30 kg 운반 시 45%, 40 kg 운반 시 52% 장치를 착용 시 근전도 감소효과를 보였다. 상자의 무게가 증가함에 감소효과가 더욱 증가함을 볼 수 있다.

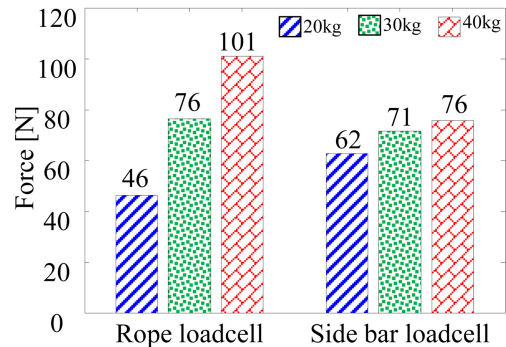
또한 로프와 측면지지대에 작용하는 힘을 측정하기 위해 BONGSHIN 사 CDFSFA 소형 로드셀을 Fig. 7(a)와 같이 로프와 그리퍼 사이와 측면지지대 연결부에 각각 장착하였다. 측정된 결과 상자를 들기 위해 허리를 굽히고 펴는 동작에서 측면지지대의 힘이 많이 걸리고 허리를 펴게 되면 로프에 장력이 걸리게 된다.

기능실험으로 측정된 값의 평균값으로 정리하면 Fig. 7(b)와 같이 상자의 무게 증가에 따라 로드셀에 걸리는 힘이 증가함을 알 수 있다. 특히, 로프에 걸리는 장력은 상자 무게에 따라 20 kg 운반 시 46%, 30 kg 운반 시 51%, 40 kg 운반 시 50%의 감소효과를 보였다. 근전도와 유사하게 상당한 감소효과를 확인할 수 있다.

외골격 장치는 사람 몸에 직접 착용함으로써 인체와의 작용점의 영향이 매우 중요하다. 이를 정량적 비교를 위해 체결 하네스와 착용자 간의 압박력을 측정 가능한 측정장치를 개발하였다. Fig. 8(a)와 같은 형상의 압박력 센서 한 개에는 12개의 FSR



(a) Location of the sensor



(b) The averaged amplitudes

Fig. 7 Results of loadcell measurement experiments

(Force Sensing Resistor)이 일정한 간격으로 배치되어 있으며 각 6개의 센서로 구역을 구분하였다. Fig. 8(b)와 같이 어깨와 허리 하네스에 장착하였다. 어깨에 위치한 센서 S-1은 장치로부터 사람에게 수직으로 누르는 힘을 측정하고 등에 위치하는 센서 S-2는 장치로부터 착용자의 등을 미는 힘을 측정한다. 허리에 위치하는 센서 W-1과 W-2는 측면지지대와 엉덩이로부터 받는 힘을 측정한다. 실험 절차에 따라 20, 30, 40 kg에 대해 각각 측정 결과 Fig. 8(c)와 같이 평균전압으로 나타낼 수 있다. 상자의 무게가 증가함에 따라 압박력이 증가함을 알 수 있다. 측정된 결과 값을 힘의 값으로 변환하는 것은 어려움으로 무게 변화에 따른 상대적 값으로 차이를 비교한다.

3. 수동형 상지 외골격장치 효과실험

3.1 효과실험 방법

수동형 상지 외골격장치의 효과검증을 위하여, 3개월 이내 근골격계 질환 없는 8명의 건강한 성인 남성 피험자(나이: 38.9±3.3세, 체중: 68.4±7.2 kg, 키: 172.5±4.3 cm)가 실험에 참가하였다. 객관적 검증실험을 위해 실험 전 간단한 사용법만 안내되었고 사전연습은 실시하지 않았다. 효과검증실험을 위해 다음과 같이 프로토콜을 선정하였다. 첫째, 긴장완화를 위해 제자리 선 자세로 2분간 대기한다. 둘째, 준비운동으로 제자리걸음 3분을 실시한다. 셋째, 0.3 m 높이의 20 kg 상자를 들고 3 m 이동 후



(a) Compression force sensor (b) Location of the sensor

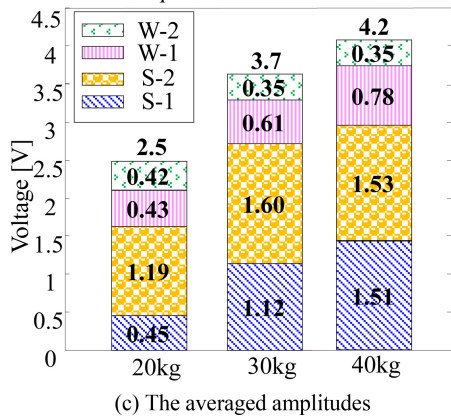
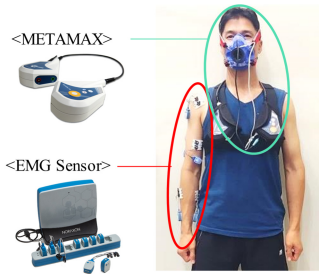


Fig. 8 Results of compression force measurement experiments



(a) Measuring devices for effect experiment



(b) Without H-Frame (c) With H-Frame

Fig. 9 Effect experiment of the H-Frame with 20 kg payload

내려 놓기를 30회 반복한다(소요 시간 약 8분). 넷째, 다시 제자리걸음 3분을 한다. 마지막으로 제자리 선 자세로 1분 유지하였다. 이와 같은 프로토콜로 H-Frame 장치를 착용했을 때와 착용하지 않았을 때의 근전도와 호흡가스분석기를 측정하였다. Fig. 9(a)는 측정장치 장착 모습을 보여준다. 각 실험 간 1시간이

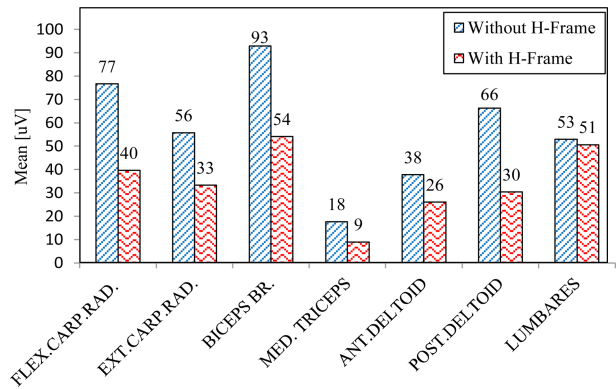


Fig. 10 Results of EMG measurement experiments with and without the H-Frame

상의 충분한 휴식 시간을 보장하였다. 그리고 장치의 착용 순서 조건의 효과를 제거하기 위해 피험자 4명은 먼저 착용하지 않고 실험을 수행하고 나머지 4명은 먼저 착용하고 실험을 수행하였다. Figs. 9(b)는 착용하지 않은 모습이고 9(c)는 착용했을 때의 실험동작 모습을 보여준다.

3.2 근전도 실험 결과

근전도 측정장치는 기능실험의 Fig. 6(a)와 같이 동일하게 7 곳의 표면 근전도를 장착하여 피험자 8명의 데이터를 수집 및 분석하였다. Fig. 10과 같이 H-Frame 착용 전과 후의 근전도 평균값을 비교하였다. 그 결과 수근굴근 48%, 수근신근 40%, 상완이두근 41%, 상완삼두근 49%, 전면삼각근 31%, 후면삼각근 54%, 요추근 4% 감소효과를 가졌으며, 측정된 전체 근전도에 대해서 평균 38% 근전도 감소효과가 있었다. 요추근을 제외한 상지근에 대해서는 44%의 감소효과를 보였다. H-Frame 착용으로 상지근에 확실한 도움이 됨을 알 수 있다. 실험 후 피험자들의 인터뷰에서도 허리의 큰 도움보다는 상지 근육에 확실한 도움을 느낀다고 말하였다.

3.3 호흡가스분석 실험 결과

에너지 소비량 비교를 위해 호흡가스분석기(Meta Max 3B, CORTEX, Germany)를 사용하여 측정하였다. 실시간으로 데이터를 수집, 분석할 수 있는 Meta Max 3B 호흡가스 분석기는 호흡상의 산소(O₂)와 이산화탄소(CO₂)의 농도를 측정할 수 있는 감지기가 있다. 이를 컴퓨터와 연결시켜 안정 시와 운동 시 호흡순환기능의 변인들을 혼합 챔버(Mixing Chamber)인 호기가스 추출법으로 호기마다 측정할 수 있고, 자동분석 프로그램(Meta Soft)으로 산소소비량(Oxygen Consumption, VO₂), 호흡교환율(Res Piratory Exchange Ratio, RER), 심박수(Heart Rate, HR) 등을 산출할 수 있다[19]. 그 결과 Fig. 11과 같이 에너지 소비량을 비교할 수 있다. 피험자1: 5%, 피험자 2: 15%, 피험자 3: 10%, 피험자 4: 9%, 피험자 5: 10%, 피험자 6: 15%, 피험자 7: 19%, 피험자 8: 6%의 감소효과를 보였다. H-Frame 착용한 경우 착용하지 않은 경우보다 평균 에너지 소비량 11% 감소

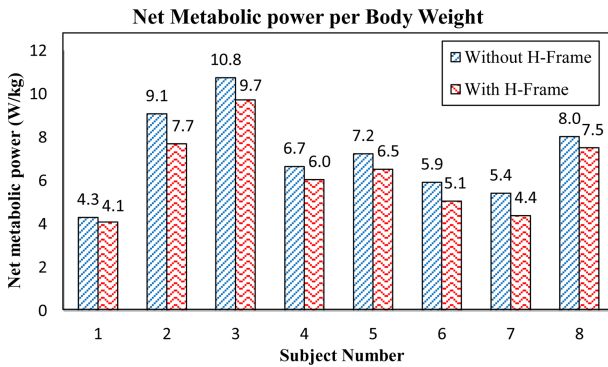


Fig. 11 Results of Gas analyzer measurement experiments with and without the H-Frame

효과를 보였다. 참고로 Harvard Biodesign Lab의 Soft Exosuits는 34.6 kg 부하를 가지고 걷는 동안 동력이 없는 상태와 동력을 사용한 경우 비교했을 때 평균 6.4%의 에너지 소비량 감소를 보여주었다[20].

4. 결론

본 연구에서는 산업 및 농업현장의 20 kg 이상 중량물을 들고 운반하는 작업에 도움을 줄 수 있는 수동형 상지 외골격장치를 개발하였다.

개발된 H-Frame의 기능실험을 위해 상자 20, 30, 40 kg에 대해 들고 운반하는 실험을 수행하였다. 수동식 장치이므로 객관적이고 정량적인 데이터 측정을 위하여 표면 근전도 센서, 하네스 압박력 센서, 로프와 측면지지대의 로드셀 값을 측정하여 분석하였다. 상자 무게 증가에 따라 측정값이 비례적으로 증가함으로 장치 기능의 이상 없음을 입증하였다.

또한 장치의 효과실험을 위해 8명 피험자를 대상으로 장치 착용 전과 후의 근전도와 호흡가스분석 실험을 수행하였다. 근전도 실험결과 상지근 전체의 평균값이 착용 후 근전도 44% 감소 효과를 보였으며 호흡가스분석 실험 결과 착용 후 평균 에너지 소비량 11% 감소 효과를 보였다. 이를 통하여 중량물 운반 시 착용자에게 도움이 되고 있음을 정량적으로 볼 수 있다. 끝으로 중량물 운반에 H-Frame을 착용함으로 산업 및 농업현장의 근골격계 질환 예방에 큰 도움을 줄 수 있기를 기대한다.

REFERENCES

1. Yang, Y., (2010), The responding strategies of musculoskeletal disease in aging society, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 29(4), 505-511.
2. Steger, R., Kim, S. H., Kazerooni, H., (2006), Control scheme and networked control architecture for the Berkeley lower

extremity exoskeleton (BLEEX), *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3469-3476.

3. Hyun, D. J., Park, H., Ha, T., Park, S., Jung, K., (2017), Biomechanical design of an agile, electricity-powered lower-limb exoskeleton for weight-bearing assistance, *Robotics and Autonomous Systems*, 95, 181-195.
4. Choo, J., Park, J. H., (2017), Increasing payload capacity of wearable robots employing linear actuators and elastic mechanism, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18, 661-671.
5. Jeong, D. H., Kang, D. Y., Lee, J. S., (2020), Development of lower-limb wearable robot with single acting hydraulic telescopic cylinder electro hydrostatic actuator (SAT-EHA) for handling of heavy loads, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(8), 579-585.
6. EksoBIONICS, EksoVest. <https://eksobionics.com/>
7. Kim, S., Nussbaum, M. A., Esfahani, M. I. M., Alemi, M. M., Jia, B., Rashedi, E., (2018), Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II-“Unexpected” effects on shoulder motion, balance, and spine loading, *Applied Ergonomics*, 70, 323-330.
8. Levitate technologies, Inc., AIRFRAME. <https://www.levitatetech.com/airframe/>
9. Gillette, J. C., Stephenson, M. L., (2019), Electromyographic assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks, *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 302-310.
10. MATE-XT. <https://mate.comau.com/>
11. Pacifico, I., Scano, A., Guanziroli, E., Moise, M., Morelli, L., Chiavenna, A., Romo, D., Spada, S., Colombina, G., Molteni, F., (2020), An experimental evaluation of the proto-mate: A novel ergonomic upper-limb exoskeleton to reduce workers' physical strain, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 27(1), 54-65.
12. Ottobock, Paexo Shoulder. <https://paexo.com/>
13. Maurice, P., Čamernik, J., Gorjan, D., Schirmeister, B., Bornmann, J., Tagliapietra, L., Latella, C., Pucci, D., Fritzsche, L., Ivaldi, S., (2019), Objective and subjective effects of a passive exoskeleton on overhead work, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(1), 152-164.
14. Laevo. <https://www.laevo-exoskeletons.com/>
15. Koopman, A. S., Kingma, I., Faber, G. S., de Looze, M. P., van Dieën, J. H., (2019), Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks, *Journal of Biomechanics*, 83, 97-103.
16. ottobock, Backx. <https://www.suitx.com/backx>
17. Kazerooni, H., Tung, W., Pillai, M., (2019), Evaluation of trunk-supporting exoskeleton, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 1080-1083. <https://>

journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1071181319631261

18. Korea Occupational Safety and Health Agency, Proper handling of goods. https://kosha.or.kr/kosha/data/musculoskeletalPreventionData_G.do?mode=download&articleNo=296617&attachNo=167197
19. Cortex, MetaMax 3B. <https://cortex-medical.com/DE/METAMAX-3B.htm>
20. Asbeck, A. T., De Rossi, S. M., Holt, K. G., Walsh, C. J., (2015), A biologically inspired soft exosuit for walking assistance, The International Journal of Robotics Research, 34(6), 744-762.



Dong-Hyun Jeong

Senior Research Engineer in the Robot Development Team, R&D Center, Hyundai Rotem. His research interest is wearable robot, rehabilitation robot.

E-mail: donghei@hyun-rotem.co.kr



Do Yeon Kang

Research Engineer in the Robot Development Team, R&D Center, Hyundai Rotem. Her research interest is wearable robot control and sensor.

E-mail: kangdoyeon@hyun-rotem.co.kr



Ji Seck Lee

Senior Research Engineer in the Robot Development Team, R&D Center, Hyundai Rotem. His research interest is wearable robot, exoskeleton suit.

E-mail: mr.lee@hyun-rotem.co.kr