

편의성 향상을 위한 산업용 착용로봇 효과도 비교 분석

이지석*, 강도연*, 정동현*

*현대로템(주)

e-mail:Mr.LEE@hyundai-rotem.co.kr

Comparison of the Effects of Exoskeleton Types to Improve Convenience for Industrial Workers

Lee Ji-Seok*, Do-Yeon Kang*, Dong-Hyun Jeong*

*Hyundai Rotem Company

요약

본 논문에서 최근 노령화 사회로의 변화와 스마트팩토리와 같은 산업현장의 작업환경 변화에 따른 입는 형태의 착용로봇을 적용하는데에 작업자의 편의성과 효과도를 정량적으로 검증하는 효과도 시험을 소개하고 구동력이 포함된 능동형 착용로봇과 수동식 기계장치로만 구성된 수동형 착용로봇의 각각의 효과도 결과와 두 형태간의 비교를 통하여 현재의 기술단계로는 수동식 착용로봇이 산업현장에서 사용자의 수용도를 확대할 수 있는 편의성으로 실용적 효과가 있음을 확인한다.

1. 서론

다양한 산업의 현장이 자동화되어 사람의 육체적 노동의 분야가 기계나 로봇으로 대체되었다. 하지만 한정적인 공간이나 설비 설치가 부적하여 여전히 사람이 직접 작업하여야 하는 일들이 존재한다. 이러한 곳에서 작업자는 신체의 일시적이거나 반복적인 작업 등의 유해요인으로 근육의 피로도가 높아지거나 통증으로 인한 근골격계질환에 대한 예방이 필요하다.^[1]

생산기술과 안전관리요소의 정착으로 산업재해는 해마다 감소하는 추세이지만 작업자의 근골격계질환 발생은 지속적으로 발생하여서 근골격계질환은 산업재해 항목 중에서 차지하는 비중이 2/3 수준까지 점점 증가하고 있다. 이러한 문제를 착용로봇(Wearable robot)으로 해결하고자 하는 시도가 다양하게 진행되고 있다.

산업현장에서 착용로봇은 작업자의 근력이나 지구력을 강화하거나 신체 근육의 피로도를 감소하는 기능을 갖추어야 하고 작업자가 쉽게 착용하여 안전하게 사용하기 위한 편의성과 안전성을 제공하여 작업 활동에서 신체에 이득이 되는 실용적인 성능을 만족하여야 한다.

착용로봇의 동작은 착용자의 의도에 따라 추가 동력을 발생하여 근력을 보조하는 능동형 구조와 기계적인 구요소로만 구성되어 인체에 부가되는 부하를 분산하거나 우회하여 작업

자의 피로도를 감소하는 수동형 구조로 구분할 수 있다.

착용로봇은 신체에 접촉되어 사람의 동작에 따라 움직이면서 근력의 활동을 보조할 때 사람에게 방해가 되는 힘으로 작용하지 않도록 사람과 로봇간의 상호작용력을 최소화하여야 작업에 대한 동작 판단과 작업속련도 또는 작업습관을 최대로 활용할 때 에너지소비를 감소하는 효과를 나타낸다.

능동형 착용로봇은 센서, 제어기와 구동기의 시스템 통제간의 시간지연이나 동작불일치 등의 시스템에러와 인체에 착용된 구조의 동작영역과 구동력이나 구동속도의 한계로 인하여 착용자에게 불편한 요소가 증가하게 된다. 수동형 착용로봇은 인체에 부착되는 구조물과 착용장치는 능동형 구조 대비하여 간소화하거나 삭제할 수 있게되어 착용과 동작의 불편한 요소를 감소할 수 있으나 동력을 추가적으로 발생하지 않으므로 근력보조의 성능은 크게 향상되지 않을 것이다.

본 연구는 사용자의 편의성을 향상하기 위해 능동형 착용로봇과 수동형 착용로봇이 착용자의 동작에 소요되는 에너지를 감소하는 효과도를 각각 시험하고 비교한다.

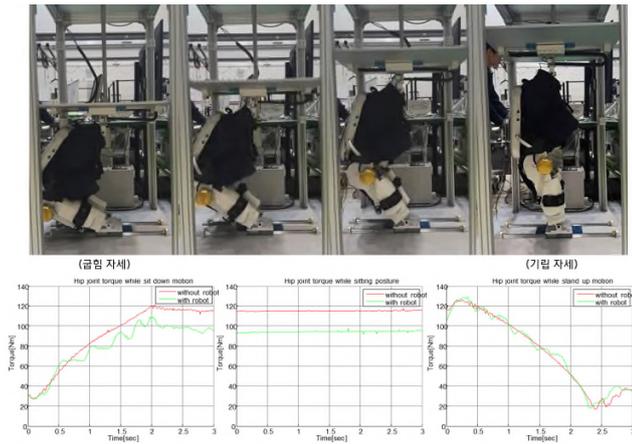
2. 능동형 착용로봇의 성능 시험

2.1 허리보조력 성능 측정

인체의 허리부분에서 전기모터의 구동력으로 반중력 토크

를 발생하여 보조하는 능동형 허리보조 착용로봇의 허리보조력 성능을 정량화하기 위하여 로봇의 토크량 측정이 필요하다. 인체의 상체와 허벅지로 구성된 시험장치를 제작하여 허리굽힘 동작과 무릎굽힘 동작을 대표적인 특징으로 모사 구현하여 로봇을 설치하기 전과 후의 동작에 소요되는 토크량을 측정하여 로봇이 갖는 허리보조율로 성능을 판단하였다.

이 실험으로 로봇의 허리굽힘과 기립의 동작에는 중력보상 알고리즘으로 토크 20Nm 수준으로 보조하여 17% 근력보조율을 나타냄을 정량적으로 확인하였다.^[2]



[그림 1] 능동형 허리보조 착용로봇의 토크 측정^[2]

2.2 작업량-작업지속을 비교 시험

25kg 무게의 박스를 이동 적재하는 작업을 반복하는 실험에서 시간당 작업증량으로 평균화하여 로봇을 착용한 작업자는 시간이 경과함에 따라 90%수준의 작업량을 유지하는 반면에 맨 몸으로 작업하는 작업자는 70%까지 하락하는 양상으로 나타났다. 이 실험의 결과는 능동형 허리보조 착용로봇을 착용하여 수행한 결과가 착용하지 않는 경우보다 작업량이 향상됨을 의미한다. 그러나 로봇을 착용한 피시험자는 허리보조 착용로봇의 근력보조의 성능에 대해서는 긍정적인 반면에, 특정 동작구간 이외의 동작에서는 도움이 되지 않고 오히려 착용할 때나 사용중에 가슴을 압박하는 착용성이나 자연스러운 동작을 방해하는 불편함을 지적하였다.



[그림 2] 능동형 허리보조 착용로봇 적용 작업

[표 1] 능동형 허리보조 착용로봇 작업지속을 실험 결과

[단위:%]	1차 (기준)	2차 (4시간후)	3차 (8시간후)
로봇착용	100	95	90
맨몸	100	69	77

3. 착용로봇의 효과도 시험

3.1 신진대사에너지 소비량(Metabolic cost) 측정

근육 활동시의 산소의 소모량(Oxygen consumption)은 신체의 운동에너지 소비량으로 나타낼 수 있고, 심박수(Heart rate)로 신체의 스트레스 지수와 바이오리듬을 분석할 수 있다. 측정된 호흡가스의 산소포화도(O_2)가 낮을수록 신체가 힘이 들거나 불편해지는 것을 의미한다.

분당 배출되는 산소량(L/min)은 5 kcal 열량을 소비하는데 사용되는 것으로 1호흡당의 신진대사의 소비에너지를 아래의 식과 같이 나타낸다.

$$\text{열량(kcal/min)} = \text{산소량(L/min)} \times 5\text{kcal} \times \text{시간(min)}$$

$$\text{MET} = \text{산소량(L/min)} \times 1.2341 \times \text{RER} + 3.8124$$

이때 MET(Metabolic Equivalent of Task)는 신진대사 에너지를 나타내고, RER(Respiratory Exchange Ratio)는 호흡교환비이다.



[그림 3] Metabolic cost 시험 구성^[3]

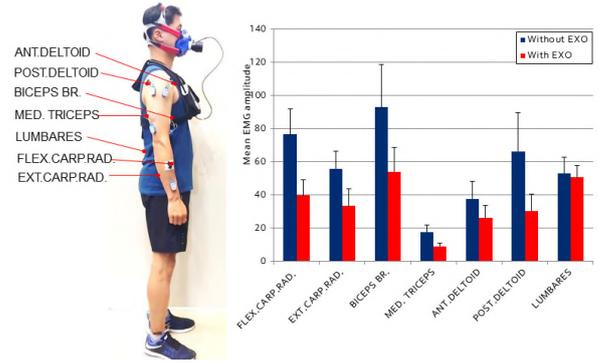
3.2 능동형 착용로봇 효과도 시험

능동형 허리보조 착용로봇의 성능이 착용자에게 미치는 신체적 영향을 정량적으로 객관화하기 위해서는 로봇을 적용하기 전과 후의 등짐의 무게로 인한 사용자의 부담을 Metabolic cost 시험으로 효과도를 분석이 필요하다.

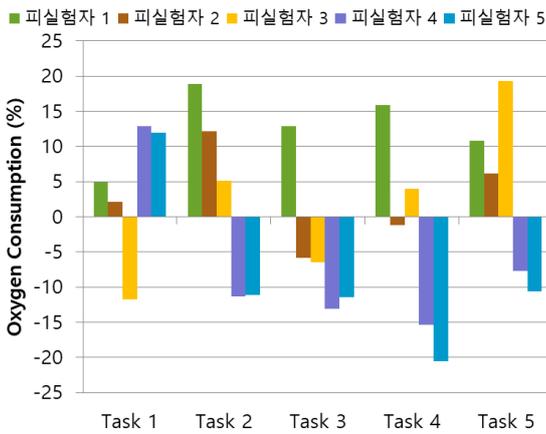
20kg 무게의 박스를 들어올려서 수평으로 2.4m 이동하여 내려놓는 동작을 일정한 박자에 맞춰서 수행하는 프로토콜을

정의하고 모든 피실험자에게 로봇을 착용하기 전과 후에 동일하게 적용한다.

실험의 결과를 살펴보면 물건을 들어 옮기는 작업(Task 3) 시 허리보조 착용로봇을 적용하였을 때 피실험자 5명 중 4명의 산소 소모량이 평균 9%가 감소 하였으나 다른 동작시(Task 1/5: 서기, Task 2/4: 제자리 걷기)에는 피실험자 5명 중 3명의 산소 소모량이 증가하는 것으로 나타났다. 로봇이 보조력을 제공하는 허리를 굽히고 펴는 동작의 동작시에는 로봇이 오히려 착용자에게 불편함이나 물리적인 부담으로 작용하는 것으로 판단된다.^[3]



[그림 5] 수동형 착용로봇 팔근육 근전활성도 효과^[4]



[그림 4] 능동형 착용로봇 착용 전/후 산소소모량 변화^[3]

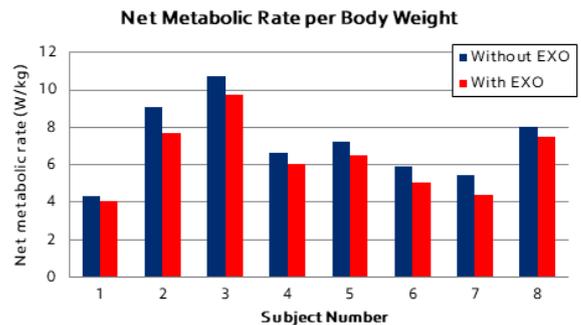
3.3 수동형 착용로봇 효과도 시험

산업현장에서 작업자는 여러 가지 동작이 복합적으로 반복되거나 예상할 수 없는 동작을 수행하게 되므로 능동형 착용로봇을 착용하였을 때는 불편함이 가중된다. 이러한 영역에서는 로봇에서 발생하는 보조력을 제거하게 되면 인체와 상호간섭력을 최소화 할 수 있다. 따라서 구동기를 제거한 수동식 착용로봇으로 사용자의 편의성을 높일 수 있지만 구동장치로부터의 보조력이 없는 구조에서 인체의 운동에 효과가 나타날 수 있는지를 능동형 착용로봇과 동일 또는 유사한 실험으로 측정할 필요가 있다.

수동식 들기보조 착용로봇은 상체에 착용하여 팔근육의 피로도를 감소할 수 있도록 어깨와 손목사이에 로프로 힘을 우회하여 전달하는 간단한 구조로 개발되었다.

이 수동식 로봇으로 20kg의 박스를 3m 거리에 이동하여 적재하는 동작을 반복하는 근전도 실험에서 팔근육의 근전활성도를 40% 수준까지 감소는 근력보조의 기능을 정량적으로 입증하였다.^[4] 또한 허리근육은 로봇 착용과 무관하게 유사한 근육활성도를 나타내어서 팔부위의 부하가 허리부위로 전이되어 허리통증을 추가적으로 유발하지 않음을 확인하였다.

동일한 프로파일로 신진대사에너지를 측정하는 실험에서는 피실험자 평균 11%의 신진대사 에너지 절감 효과를 정량적으로 확인하였다. 능동형 착용로봇보다 착용감과 운용의 편이성이 월등히 향상되었지만 그러나 팔에 부착된 로프의 길이제한으로 착용자가 팔을 뻗는 동작의 제한과 로프와 프레임으로 인한 환경과의 간섭이 발생하는 점은 보완이 필요하다.



[그림 6] 수동형 착용로봇의 단위체중당 MET 효과^[4]

4. 능동형과 수동형의 효과도 비교

4.1 MET 감소율 비교

능동형 허리보조 착용로봇과 수동형 들기보조 착용로봇의 산소소화도 측정을 통한 신진대사에너지 실험에서 참가한 피실험자들의 로봇 착용 전과 후의 MET 평균값의 변화량을 비교하면 수동형 착용로봇의 효과도가 2배 수준으로 높은 것으로 분석된다. 능동형 로봇의 피실험자의 효과도가 증가한 데이터만으로 비교하면 수동형과 유사하게 10%로 나타난다.

두 실험에서 피실험자의 숙련도와 인체의 동작의 미치는 로봇의 역할이 동일하지 않는 등의 차이로 인한 편차와 오차가 있다. 하지만 두가지 형태의 로봇의 동작에 대한 정합성과 각각에 적용된 로봇의 기능과 성능을 비교하는 것이 아니라

로봇을 착용하기 전과 착용한 후의 운동으로 인한 산소포화도와 신체가 받게되는 스트레스와 같은 피로도의 감소효과를 로봇의 효율로 비교하는데는 적합한 결과라고 볼 수 있다.

[표 2] 착용로봇 형태 (능동형, 수동형)의 MET 효율 비교

	Without EXO	With EXO	전체효율	유효효율
능동형	7.71	7.22	11.1%	11.1%
수동형	7.18	6.38	6.4%	9.7%

4.2 수동형 착용로봇의 사용자 수용도

본 논문을 통하여 산업현장에서 안전하게 사용할 수 있는 착용로봇의 보조동력의 유무에 따른 능동형 착용로봇과 수동형 착용로봇의 소비에너지 감소율 측정 실험의 결과를 비교하였다.

이미 익숙한 습관이나 행동을 하는데 새로운 도구나 방식을 적용하는데 사용자가 받아들일 수 있는 정도를 사용자의 수용도라고 할 수 있다. 사용자의 수용도는 개인마다 차이가 있을 수 있고 집단의 문화와 교육에 따라 수용도의 상승속도가 차이가 있을 수 있다.

작업자가 수행하는 동작은 물건은 들어올려서 이동하는 동작 이외에도 다양한 신체부위의 여러 가지 동작을 수반하게 됨에 따라 착용된 로봇이 그 동작을 보조하게 않게 되었을 때 오히려 신체의 동작을 방해하거나 압박하는 피로도 증가의 요인이 되는 것으로 판단된다.

능동형 허리보조 착용로봇은 골반을 접거나 펴는 동작의 지원을 하는 구동기를 견고하게 신체에 부착하기 위해서 체결한 허벅지와 어깨와 허리의 결박으로 인한 압박과 그에 따른 구조적인 동작범위의 제약과 동작인식과 제어의 오차로부터의 상호작용력의 상승에 따라 정의되지 않은 다른 동작에서 효과를 절감하게 되므로 작업자가 사용하는데 불편함이 증가하게 된다.

이러한 불편함을 개선하기 위한 수동형 들기보조 착용로봇은 인체에 최소의 결박으로 작업자의 동작시 관절의 운동은 인체에 의존하고 운동시 부가되는 힘의 전달을 신체의 피로도가 높지않은 부위로 우회하거나 분배하게 하므로 사용자의 근육 피로도가 감소하여 육체와 감성의 스트레스가 낮아지게 된다.

착용로봇은 아직 사람들에게 처음 소개되는 기술이므로 몸에 부착하는 불편함과 불쾌감으로 인하여 그 성능과 기능 및 효과보다 사용자의 수용도가 부족하게 되어 사용을 하지 않게 될 수 있다. 따라서 초기에는 사용자의 편의성을 중점하여 최소한의 수용도로도 사용하는데 안전하고 근골격계질환 예

방의 효과를 나타낼 수 있는 수동형 착용로봇의 개발과 확대 적용을 기대할 수 있다.

또한 근로환경과 시대 문화의 측면에서 수요가 증가하고 있는 현장에서 노동자의 착용로봇 수용도를 높이기 위해서는 작업시간 외의 사용을 위한 착용과 탈용의 시간을 최소화하고 개인위생과 산업안전 등의 체계적인 관리가 될 수 있도록 제도화가 필요하다.

5. 산업용 착용로봇의 실용화 연구

사람의 인체에 직접 접촉하여 그 기능과 성능을 구현하는 착용로봇은 학계에서 기술적인 한계를 극복하고 새로운 기술을 연구하는 동안 산업계에서는 인간이 그 기술을 잘 활용해 갈 수 있도록 실용화에 대한 다양한 현장적용 시도가 협력되어야 한다.

본 연구에서는 로봇의 목적에 필요한 동작에 대한 에너지 절감을 측정하고 비교하였다. 향후에는 실제 기술과 제품을 운용하는 현장에서 추가적으로 더 많은 피실험자를 대상으로 여러 차례 실험을 반복하여 실험의 신뢰도를 향상하고 또한 작업에 필요한 동작과 부수적인 동작 및 일상적인 생활 동작과의 복합적인 프로파일을 정의하여 소모에너지의 측정과 신체 근육의 활성도를 측정하고 분석하는 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 이지석, 강필순 “산업노동 작업분석을 통한 부분착용식 로봇모듈 개발” 한국산학기술학회 춘계학술대회, 2014년
- [2] 정동현, 하태준, 이지석 “허리보조력 측정장치 개발” 한국정밀공학회 춘계학술대회, 2019년
- [3] 강도연, 박현석 “허리보조 착용로봇의 성능 입증을 위한 에너지 소비량 측정 및 결과” 한국정밀공학회 춘계학술대회, 2019년
- [4] 정동현 “상지를 위한 중량물 취급 장치 개발 및 효과분석” 한국정밀공학회 춘계학술대회, 2019년