

고중량물 이송을 위한 착용형 로봇의 설계 및 제작

Design of Wearable Robot to Carry Significant Loads

*이종원¹, 김효곤², 최원태³, 박재준³, 손웅희², 한창수⁴, 박상덕²

*J. W. Lee¹(jongwon@ust.ac.kr), H. G. Kim², W. T. Choi³, J. J. Park³, W. H. Shon², C. S. Han⁴, S. D. Park²

¹ 과학기술연합대학원대학교 지능형로봇공학과, ² 한국생산기술연구원 로봇기술연구부, ³ (주)KNR, ⁴ 한양대학교 기계공학과

Key words : Wearable Robot, Exoskeleton, Lower Limb

1. Introduction

최근 인간의 근력을 보조/증폭 시켜줄 수 있는 착용형 로봇이 국내외적으로 활발히 연구되고 있다. 착용형 로봇은 노약자와 장애인을 대상으로 보행 보조 및 재활의 목적으로 사용되어 질 수 있으며, 정상인을 대상으로 근력을 증폭시키는 목적으로도 사용되어 질 수 있다. 근력 증폭의 목적으로 쓰이는 착용형 로봇은 재활 및 보행 보조를 목적으로 하는 착용형 로봇과는 다른 특징을 지닌다. 일반적으로 보행 보조 및 재활을 목적으로 하는 사람들은 노약자 및 장애인의 경우가 대부분이므로 주변 환경에 대한 대응을 사람 대신 로봇이 스스로 판단하고 대처할 수 있는 기능이 있어야 한다. 이에 반해 근육 증폭을 목적으로 한 착용형 로봇은 로봇이 사람의 의도를 잘 파악하고 잘 추종하지만 한다면, 주변 환경에 대한 판단 및 대응을 사람이 할 수 있으므로 제어의 효율성이 극대화 될 수 있다. 이와 같이 근력 증폭을 위한 로봇으로는 미국 DARPA의 EHPA(Exoskeletons for Human Performance Augmentation) 프로그램을 통해 개발된 버클리 대학의 BLEEX와 SARCOS 사의 WEAR, 그리고 일본 츠크바 대학에서 개발한 HAL이 대표적이다 [1]. 버클리 대학의 BLEEX는 유압 리니어 액추에이터를 사용하였으며, 자체 동력으로 독립보행 할 수 있는 것이 가장 큰 특징이다 [2]. SARCOS 사의 WEAR 는 유압 회전형 액추에이터를 사용하였으며 단 3개의 접촉점(양 발과 허리 부분)을 이용하여 착용자의 의도를 파악하여 제어하는 것이 특징이다 [1]. 츠크바 대학의 HAL은 EMG 센서를 이용하여 근육 신호를 바탕으로 착용자의 의도를 파악해 작동 한다 [3].

이러한 착용형 로봇은 사람이 로봇을 착용하고 작동 하므로 사람의 동작을 추종하지 못하게 되면 착용자는 불편함을 느끼거나 심각한 부상을 당하게 된다. 따라서 본 연구에서는 고중량물을 싣고 보행하기 위한 착용형 로봇을 설계, 제작함에 있어서 필요한 인간의 보행 데이터를 분석하고, 이를 이용하여 로봇에 요구되는 관절 동작 범위, 최소 필요 토크, 각속도 등을 얻었다. 또한 이러한 요구 조건들을 만족시키기 위하여 액추에이터 형태 및 장착 위치 등을 결정하여 설계 및 제작하였다.

2. Biomechanics of Human Walking

본 연구의 목적에 부합한 착용형 로봇을 설계 및 제작하기 위해서는 인간의 보행을 운동역학 관점에서 분석할 필요가 있다 [1]. 만약, 사람이 보행을 하는데 사용하는 힘보다 착용형 로봇이 낼 수 있는 힘이 적다면 사람에게 부하로 작용될 것이 분명하기 때문이다. 본 연구에서는 한국인 18~40세 10명의 정상인이 1.1m/s의 속도로 보행을 할 때, 4개 자유도(Hip Adduction/Abduction, Hip Flexion/Extension, Knee Flexion/Extension, Ankle Flexion/Extension)에 대한 관절 동작 범위와 관절 토크를 분석하였다. Fig. 2 와 Fig. 3은 각각 인간 보행 주기에 따른 각 관절의 운동 범위와 발생되는 토크의 변화를 그래프로 나타내고 있으며, 70 kg의 보행자가 1.1 m/s의 속도로 보행하고 있을 때 각 관절에서 걸리는 최대 각속도 및 최대 관절 토크를 Table 1에 나타내었다.

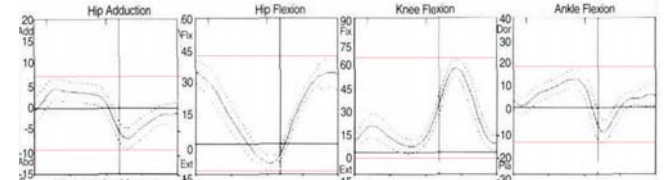


Fig. 1 Ranges of motion of the saggital plane. Adapted from [4].

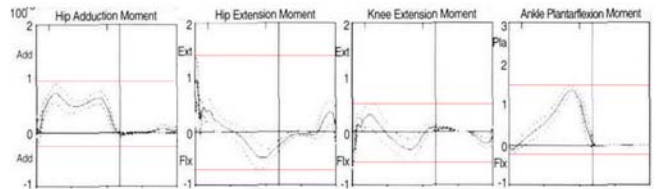


Fig. 2 Joint torque of the saggital plane. Adapted from [4].

Table 1 Key parameters in gait analysis

Condition	Weight	70 kg
	Walking Velocity	1.1 m/s
Key Parameters	Max. Joint Velocity	5 rad/s
	Max. Hip Ab/Ad Joint Torque	70 Nm
	Max. Hip Fl/Ex Joint Torque	90 Nm
	Max. Knee Fl/Ex Joint Torque	35 Nm
	Max. Ankle Fl/Ex Joint Torque	105 Nm

3. Wearable Robot Design

Actuator Selection

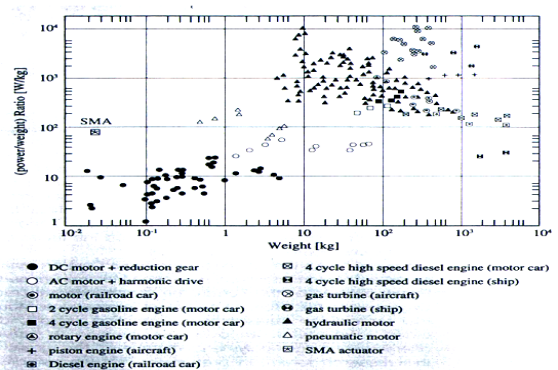


Fig. 3 Power/weight ratio according to the type of actuators

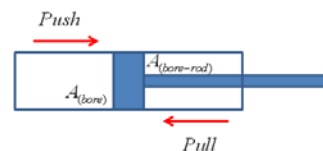


Fig. 4 Schematic of bi-directional linear hydraulic actuator

$$\begin{aligned}
 f_{Push} &= P_{Supply} \cdot A_{(Bore)} \\
 f_{Pull} &= P_{Supply} \cdot A_{(Bore - Rod)} \\
 Q_{Push} &= d_{Push} \cdot A_{(Bore)} \\
 Q_{Pull} &= d_{Pull} \cdot A_{(Bore - Rod)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

착용형 로봇에 장착될 유압식 리니어 액추에이터는 하중이 90 kg ~ 150 kg 구간에서 다른 형태의 액추에이터보다 뛰어난 무게 대 출력 비를 가지고 있으며 (Fig. 3), 유압식 회전형 액추에이터보다 크기 및 무게가 작고 내부/외부 누유 량이 적으므로 에너지 측면에서에서 장점이 있다. 본 연구에 사용되는 복동 실린더를 Fig. 4 에 나타내었다. 단 로드형 이므로 로드를 밀고 당길때의 힘과 유량이 차이가 나며, 압력 및 유량 손실을 무시할 때의 힘과 유량은 식 (1)과 같다.

Determination of Optimal Actuator Location

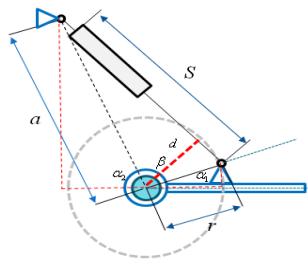


Fig. 5 Configuration of a linear hydraulic actuator.

본 연구에서 개발된 착용형 로봇은 유압 리니어 액추에이터를 이용하여 관절의 회전동작을 구현하는 시스템이다. Fig. 4 에 이를 도식화 하였으며 관절 각도와 액추에이터 스트로크 간의 관계식은 식 (2)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 \theta &= \pi - \{ \alpha_1 + \alpha_2 + \beta \} \\
 \dot{\theta} &= - \frac{\sqrt{a^2 + r^2 - 2ar \cos(\beta)}}{ar \sin(\beta)} \dot{S} \\
 \beta &= \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + r^2 - S^2}{2ar} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

식 (2)에서 관절의 동작 범위와 각속도는 액추에이터의 장착 위치와 액추에이터의 스트로크 길이에 함수이므로 이를 적절히 조절하여 인간의 관절 동작 범위를 만족시키면서 동작 범위 내에서 Table 1에서 제시한 최대 관절 토크 및 각속도를 충족시키도록 설계 하였다.

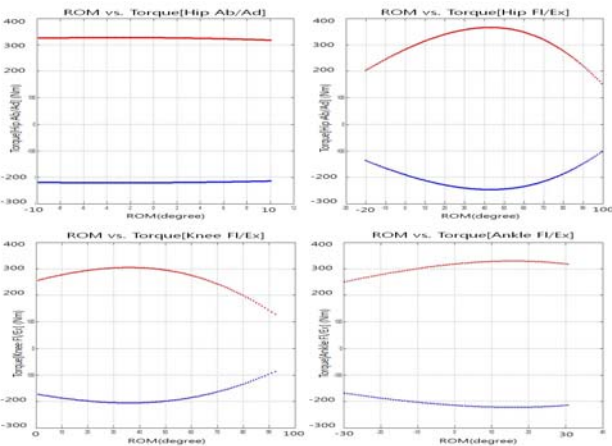


Fig. 6 Joint torque vs. ROM

Hydraulic Flow and Power Consumption of Wearable Robot

착용형 로봇에 요구되는 최대 유량은 식(1) 과 같이 최대 각속도를 내기위한 실린더 로드의 속도와 유효단면적의 곱으로 나타낼 수 있으며, 필요 동력은 유량과 공급압력의 관계에서 구할 수 있다. 내부 및 외부 누유나 서보밸브에서의 누유량은 무시하고 계산한 결과, 설계된 착용형 로봇은 약 30.6 lpm 의 유량과 5.4 kW 의 유압동력을 필요로 한다.

Table 2 Total flow and power consumption

Condition	Supply Pressure	210 bar
	Max. Joint Velocity	5 rad/s
Flowrate & Power Consumption	Total Flowrate	30.6 lpm
	Total Power Consumption	5.4 kW

5. Conclusion

본 연구에서는 고 중량물을 싣고 보행하기 위한 착용형 로봇을 설계 및 제작하기 위하여 인간의 보행 분석 데이터를 분석하고, 이를 기반으로 액추에이터의 형태 및 장착 위치를 결정하였다. 또한 위치 결정에 따른 착용형 로봇 각 관절이 낼 수 있는 토크를 도출하였으며, 착용형 로봇이 낼 수 있는 최소 관절 토크가 보행 시 사람의 관절에서 필요로 하는 토크보다 크게 설계 된 것을 알 수 있었다 (Table 3). 향후 동역학 시뮬레이션을 수행하여 설계된 착용형 로봇의 검증을 진행하여 설계에 대한 수정 및 보완을 할 계획이다.

Table 3 Max. human joint torque vs. Min. wearable robot joint torque

Joint	Max. Joint Torque of Human	Min. Joint Torque of Wearable Robot
Hip Ab/Ad Joint	70 Nm	210 Nm
Hip Fl/Ex Joint	90 Nm	100 Nm
Knee Fl/Ex Joint	35 Nm	80 Nm
Ankle Fl/Ex Joint	105 Nm	170 Nm

Acknowledgements

본 연구는 한국생산기술연구원 SEED형 연구사업(Super Soldier/Labor 구현을 위한 고풍력 외골격 로봇 슈트)의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

References

1. Aeron M. Dollar, Hugh Herr, "Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art," IEEE Transaction on Robotics, Vol. 24, no. 1, pp. 144-158, February 2008.
2. H. Kazerooni, Jean-Luis Racine, Lihua Huang and Ryan Steger, "On the Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)," in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, pp. 4345-4352, Apr. 2005.
3. Lee S., Sankai Y., "Power Assist Control for Working Aid with HAL-3 Based on EMG and Impedance Adjustment around Knee Joint," in Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS 2002), EPFL, Switzerland, pp. 1499-1504, 2002.
4. 정진엽, 박문석, 최인호, 조태준, 유원준, 김진영, "정상 한국인의 3차원 보행 분석," 대한정형외과학회지, 40, 83-88, 2005.