

산업현장 적용을 위한 착용식 근력증강 로봇의 설계

Wearable Robot Design for Industrial Application

하태준^{1,✉}, 이지석¹, 백성훈^{2,3}, 김석환², 이정엽²
Tae-Jun Ha^{1,✉}, Jiseok Lee¹, Sunghun Back^{2,3}, Seok Hwan Kim² and Jung Yeob Lee²

¹ 현대로템 기술연구소 제어연구팀 (Control Research Team, Hyundai Rotem)

² 현대로템 기술연구소 중기선형개발팀 (Advanced Programs Team, Hyundai Rotem)

³ 한양대학교 메카트로닉스 공학과 (Department of Mechatronics, Hanyang Univ.)

✉ Corresponding author: taejuny@hyundai-rotem.co.kr, Tel: 031-596-9609

Manuscript received: 2011.9.6 / Accepted: 2011.12.28

Various studies to improve the physical abilities of the human have been steadily continued from the past to the present. Only recently such technology has been realized, and those are expected to replace or complement human beings in large part. In this paper, the current status of developed wearable robots is investigated and studies were conducted in order to apply the types of robots in industry spot. In order to apply wearable exoskeleton robot to industry which enhances human physical capability, driving range of the robot's degrees of freedom were selected by analyzing working motion, and augmentative exoskeleton structure design process is presented by analyzing require torque and power during selected working motion. At the end of this paper, the designed mock-up is introduced to validate the feasibility of designed robot.

Key Words: Wearable Robot (착용식 로봇), Exoskeleton (외골격), Structure Design (기구 설계), Working Motion Analysis (작업동작 분석)

기호설명

τ_h : pitching torque of hip joint
 τ_k : pitching torque of knee joint
 τ_a : pitching torque of ankle joint
 θ_h : driving pitching angle of hip joint
 θ_k : driving pitching angle of knee joint
 θ_a : driving pitching angle of ankle joint
HRI: Human Robot Interaction

1. 서론

인간의 능력을 향상시키기 위한 많은 선행연구가 과거로부터 활발하게 이루어져 왔고 최근에 들

어 다양한 연구 성과들이 나타나기 시작하였다.¹⁻⁵

현재 착용식 외골격 로봇의 대표적 성과물은 미국 Raytheon社와 Lockheed Martin社 그리고 일본의 CyberDyne社에 의해 개발되었다. 그 중 Raytheon社의 XOS⁶는 버전 1에 이어 최근 버전 2를 공개하였으며 전신 착용형 외골격 로봇이다. 자체중량이 68kg인 XOS는 외부의 유압동력원으로부터 동력을 공급받아 운용되며 가반하중 84kg, 최대 보행속도는 5.8km/h라고 보고되었다.

또 다른 선두주자라 할 수 있는 Lockheed Martin社의 HULC⁷는 하지의 운동만을 보조하며 약 70kg의 가반 하중 하에서 동작이 가능하다고 발표되었다. 독자적인 동력원(Hybrid electrohydraulic power)을 사용하여 약 17시간의 운용시간을 보인

다. HULC 는 미군의 빠른 기동력을 위해 개발되었으며 현재 다양한 용도(하이킹, 환자보조 등)로 변형, 개발되고 있다.

마지막 대표주자인 CyberDyne 社의 외골격 수트 HAL-3^{8,9} 은 사용자의 근전도 신호를 받아 사용자의 동작의도를 인지하여 근력을 증대시켜주는 로봇이다. 근전도 신호의 특성상 다양한 사용자에 대한 신호획득이 어렵다고 알려져 있는데 최근 제품을 대여형식으로 상업화 계획을 발표하기도 하였다.

상기 모델 중 XOS 와 HULC 는 병사용 로봇으로 개발되어 산업용으로 사용하기에는 용도가 적당하지 않고 HAL 은 환자 또는 노약자를 위하여 개발되었기 때문에 착용자의 동작의도 획득을 담당하는 HRI 에 사용되는 EMG 센서는 산업현장 작업자에 적용하기에는 어려움이 있다. 앞서 언급되지는 않았지만 산업용으로 개발된 혼다社의 보행보조 장치(WAD¹⁰ -Walking Assist Device)는 작업자의 불편한 자세를 보조해 주기 위한 장치로 작업자의 근력을 증강시키는 용도로 보기에 어려움이 있다. 이와 같이 현재 개발된 착용식 근력 증강 로봇은 제한된 목적에 맞게 제작되어 있으며 산업현장작업을 목표로 개발되지 않아 근로자의 사용에 있어서 효율뿐만 아니라 비용 면에서도 적합하지 못하다는 것을 알 수 있다.

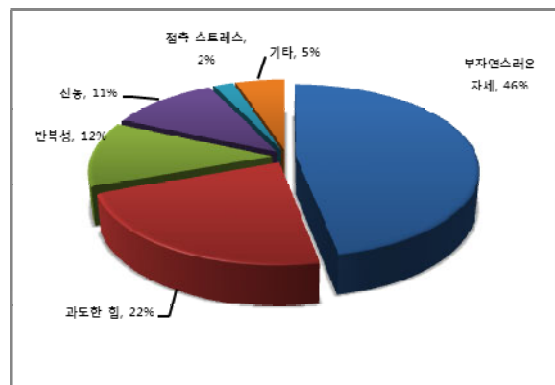
따라서 중량물을 운반하고, 조립하고, 들어 올리는 대부분의 작업은 고하중 근육작업으로 분류되며 위험도가 다른 작업에 비하여 상당히 높다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 인체 착용식 힘증강 로봇 시스템의 개발이 시급한 실정이다.

2. 적용대상 공정 및 작업환경

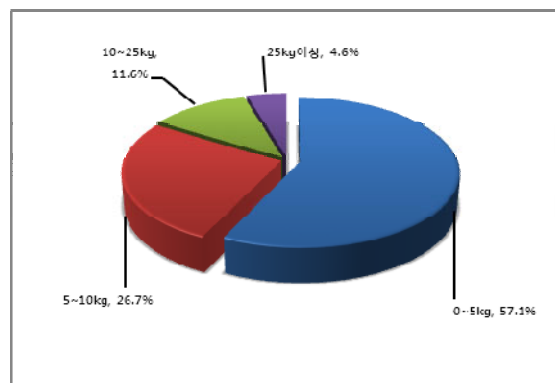
개발이 요구되는 착용식 외골격 근력증폭 로봇의 현장적용을 위하여 현대로템(주) 창원공장의 현장분석을 실시한 결과를 아래 Table1 과 Fig. 1 에 나타내었다. 근골격계 질환의 주요 유해요인인 부자연스러운 자세 및 과도한 힘을 사용하는 작업이 개선되어야 할 작업으로 선정되었으며 본 연구에서는 25kg 이상의 중량물을 취급하는 작업, 부자연스러운 자세로 장비투입이 난해한 작업 및 로봇 적용으로 인한 공정개선 효과가 큰 작업을 대상공정으로 선정하고자 하였으며 그 결과 근골격계 질환의 주원인인 중량물을 대상으로 하는 작업에 대한 근력을 증폭해주는 로봇의 개발을 목표로 선정하였다.

Table 1 On-site working process analysis

Main type of working motion	Vote	Ratio (%)
Arm, hand / wrist, and fingers have to use the frequent repetitive motion tasks	1,063	15.5
Task of twisting or bending at the waist	829	12.1
Task of bending, folding back, or twisting neck	713	10.4
Sitting down and working for a long time	688	10.0
kneeling or sitting down	651	9.5
Standing for a long time	558	8.1
reaching out and holding arms or hands	545	7.9
Operations in more than shoulder height	423	6.2
Heavy lifting operations	385	5.6
Leaning or bending forward the body	370	5.4
Pushing or pulling heavy	325	4.7
Working with vibration tools (hammers, grinders, impact, etc.)	306	4.5



(a) Needs to improve work



(b) Weight distribution of handling items

Fig. 1 Categorization of Industrial Working

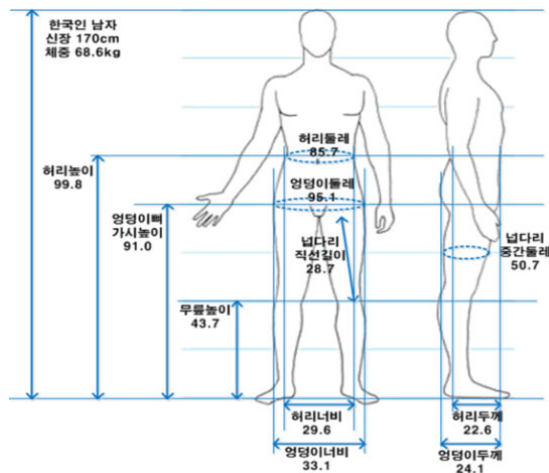


Fig. 2 Average Body Size of the Korean Male Adult

착용식 로봇의 설계 치수를 산정하기 위하여 상기 언급된 공정을 수행하는 현장 작업자의 평균 신체사이즈를 16 개 팀/ 325 개의 공정/ 791 개의 단위작업을 실시하는 현장작업자 2,066 명에 대하여 분석 결과 평균 47.1 세 연령과 170.2cm 의 평균 신장, 그리고 68.6kg 의 몸무게(Fig. 2)를 나타내었다.

이와 같은 작업자들의 다양한 대상 공정중 개선이 우선시 된다고 판단되는 철도차량의 측면도어 취부작업을 선정하였다. 대상 작업은 현재 3 인이 협동 작업을 하여야 하며 취부 작업에도 상당 시간이 소요되어 작업공정 개선 시 생산량 증가로 이어질 수 있는 작업으로 판단하였다. 대상 작업을 실시하는 작업장의 크기는 전동차 내부 가로 18m, 세로 3m 의 공간이며 무게 40kg 의 도어취부 작업을 하게 된다.

선정된 작업 간 인체의 관절 운동 범위를 파악하기 위하여 카메라를 이용한 모션캡처 장비를 이용하였다. 측면 도어의 취부 작업은 파지, 양중, 회전, 이송, 취부의 5 가지 동작(Fig. 3)으로 세분화할 수 있고 해당 작업을 수행하며 작업간 관절의 구동각 및 주요 관절 소요 토크를 지면에 장착된 force-plate 에서 측정된 지면 반력과 모션캡처 카메라와의 연동을 통해 주요 근육의 근력과, 길항력, 관절 토크등을 입력값으로 하여 인체 역동역학 해석 소프트웨어(AnyBody Modeling System™)를 이용, 15kg 의 모의치구를 통한 시험 결과를 40kg 가반하중에 대한 관절별 구동각에 따른 소요 토크를 예측하였다. 이때 측정된 주요 관절의 구동각을 아래 Table 2 에 나타내었다. 측정된 관절

의 구동각을 통하여 외골격 구조물의 기구학적 구동범위를 제한하고 자중 및 가반하중에 대한 강도 해석을 통하여 링크부 설계에 반영하도록 한다.

Table 2 Measured main joint angle range determined by motion capture equipment (degrees)

	Pick up 0		Pick up 90	
	max	min	max	min
Hip Flex.(L)	124.7	-2.3	33.4	-0.87
Hip Flex.(R)	127.8	-5.8	34.2	-3.92
Knee Flex.(L)	132.0	3.73	42.6	3.73
Knee Flex.(R)	133.1	6.30	41.1	7.17
Ankle Flex.(L)	64.36	1.34	27.5	8.75
Ankle Flex.(R)	59.52	2.83	24.6	5.98
	Gait		Take down	
	max	min	max	min
Hip Flex.(L)	21.4	-18.6	21.4	-18.6
Hip Flex.(R)	20.5	-16.8	20.5	-16.8
Knee Flex.(L)	68.8	-0.07	68.8	-0.07
Knee Flex.(R)	68.0	2.31	68.0	2.31
Ankle Flex.(L)	31.9	8.55	31.9	8.55
Ankle Flex.(R)	30.7	2.70	30.7	2.70

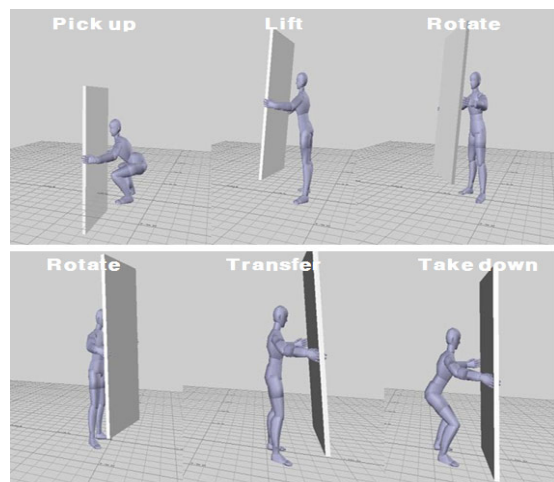


Fig. 3 Classification of the Target Working Process

상기 Table 2 와 같이 분석된 대상공정 수행간 주요 관절의 구동각도를 보면 고관절 pitching 은 127.8° 에서 -18.6° 의 각도로 구동각을 보이고 무릎관절 pitching 은 133.1° 에서 -0.07° 의 구동각 범위를 보인다. 발목관절의 경우 64.36° 에서

1.34°의 구동각 범위가 측정되었다. 상기 시험에서는 대상물체(철도차량 측면도어)를 가로로 놓힌 상태(Pick Up 0)와 세로로 세운 상태(Pick Up 90)의 두 가지 경우에 대하여 측정하였으며 시험결과를 바탕으로 대상 작업물은 세로로 세운 상태에서 양중 하는 것이 로봇관절 구동에 적합하다 판단되어 가로로 놓힌 작업은 생략하게 되었다. 결과적으로 고관절 pitching 은 34.09°에서 -18.6°, 무릎관절 pitching 은 68.79°에서 -0.07°, 발목관절 pitching 은 31.87°에서 2.7°의 범위에서 구동할 수 있도록 로봇 설계의 참고치수로 선정하게 되었다.

또한 대상 작업공정 수행간 구동기의 요구 성능을 파악하기 위하여 모션캡처 장비와 연동된 force plate 에 측정되는 지면반력을 인체 역동역학을 통해 관절 구동각에 따른 소요 토크를 예측하였고 그에 따른 결과를 아래 Fig. 4 와 5 에 나타내었다. 소요 토크는 이송동작과 양중동작에 대하여 분석하였으며 보행간 고관절, 무릎관절, 발목관절 pitching 방향에 대한 결과 그래프를 도시하였다. 이에 따라 관절에 따른 소요 토크를 만족시키도록 외골격 로봇의 구동기가 설계되어야 한다.

큰 가반하중에 대응하기 위하여 본 연구에서는 공급압력 조절을 통한 출력힘 또는 출력 토크를 조절하기가 용이한 유압식 구동기를 사용하도록 하였다. 유압식 구동기는 크게 회전형(Fig. 6 (a))과 직선형(Fig. 6 (b))의 두 가지 종류가 있는데 그 중 회전형 구동기는 회전운동이 일어나는 관절에 직접 배치되기 때문에 공간배치가 용이하여 사용자 신체 사이즈에 따른 링크길이 조절이 용이할 뿐 아니라 베어링 및 마운팅 샤프트 등의 부수적 부품의 수를 줄일 수 있다. 또한 회전운동간 각도에 따른 출력토크가 일정하여 로봇의 다양한 자세에서 동일한 회전 토크를 낼 수 있는 장점이 있다. 또한 입력되는 유압 및 유량을 조절하여 출력 토크를 조절할 수 있는 장점이 있다. 하지만 내부 실링이 어려워 실린더 내부의 작동유가 누유되는 단점이 있고 구동기의 단위 질량당 출력 토크는 낮은 것이 단점으로 꼽힌다.

또 다른 구동기인 직선형 실린더 타입 구동기는 많은 기술개발이 이루어져 내부 누유가 거의 없고 단위 질량당 출력 힘이 큰 것이 장점이다. 하지만 직선형 구동기를 통해 회전운동을 만들게 되면 모멘트 암의 입력각도에 따라 회전관절에서

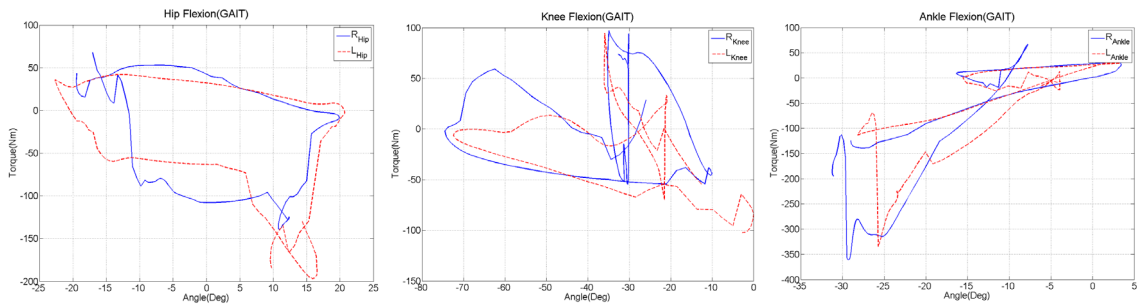


Fig. 4 Joint angle VS Required torque (Gait)

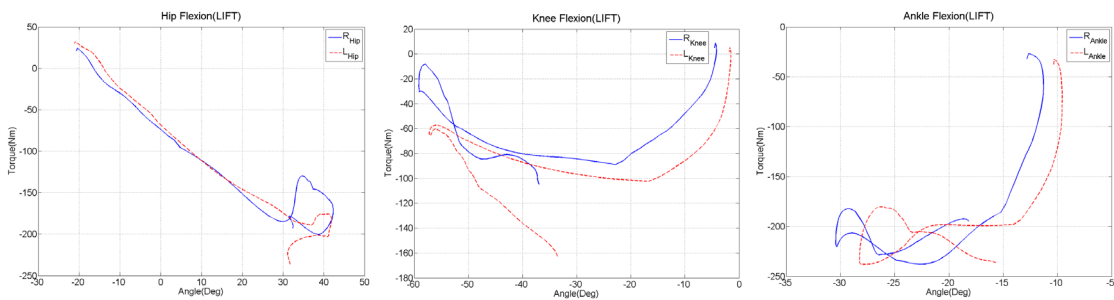
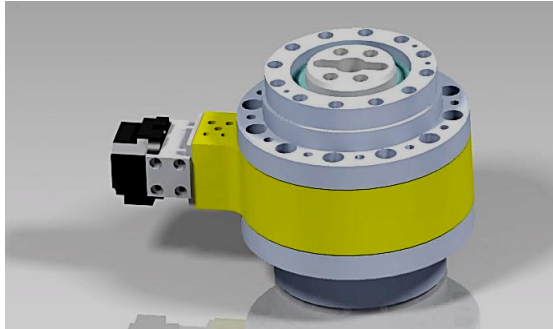
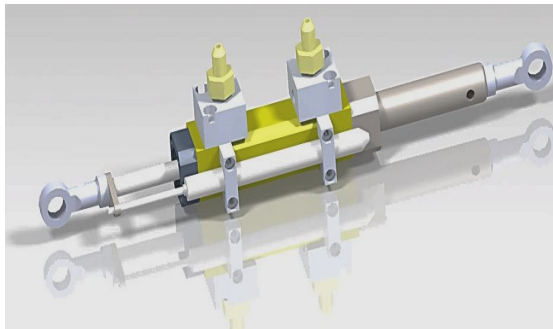


Fig. 5 Joint angle VS Required torque (Lift)

의 출력 토크가 달라지는 단점이 있다. 또한 사용자에게 따른 링크길이 조절이 불가결한 착용식 로봇에서 길이조절이 가능하도록 하는 데에는 부수적인 메커니즘이 추가되어야 하는 단점이 있다.



(a) Rotary type hydraulic actuator



(b) Linear type hydraulic actuator

Fig. 6 Hydraulic actuator

이상과 같이 두 가지 타입의 구동기를 각각 관절의 특성을 분석하여 타당한 구동기를 배치 설계하도록 한다. 그 결과를 Table 3 에 나타내었다.

Table 3 Driving range of major joint and the actuator selection according to the required torque

Item	Hip pitch	Knee pitch	Ankle pitch
Driving range(deg.)	$-10 < \theta_h < 90$	$0 < \theta_k < 90$	$-20 < \theta_a < 30$
Required torque(Nm)	$-70 < \tau_h < 110$	$-35 < \tau_k < 60$	$-120 < \tau_a < 10$
Characteristic	Wide range High torque	Wide range Low torque	Narrow range High torque
Actuator selection	Rotary	Rotary>Linear	Linear

상대적으로 큰 구동각과 적은 토크를 필요로 하는 고관절과 무릎관절 pitching 축에는 회전형 구동기를 배치하고 작은 구동각 범위를 가지며 큰 토크를 필요로 하는 발목관절 pitching 축에는 직선형 구동기를 배치하였다. 사용자에게 따른 길이조절은 링크길이 조절이 자유롭도록 허벅지, 종아리 부분에 위치하였다.

3. 근력증강로봇 외골격 구조 설계

3.1 외골격 로봇의 자유도 및 구동기 선정

상기 시험을 통하여 대상공정간 주요 관절의 구동범위 및 관절에 걸리는 토크를 예측하였고 이를 바탕으로 외골격 로봇 기구부의 메커니즘을 구현하였다. 해당 공정을 수행하는 동안 하지부의 주요 동작 관절은 고관절 3 자유도, 무릎 1 자유도, 발 및 발목 2 자유도로 하지부에서는 총 12 자유도의 동작이 발생하고, 그 중 상대적으로 큰 토크가 소요되는 관절은 고관절 pitching, 무릎 pitching, 발목 pitching 관절로 총 6 개의 능동관절로 구성하도록 하고 나머지 6 개의 관절을 수동형 관절로 구성하여 하지부 관절배치를 하였다. 또한 능동관절 중 상대적으로 큰 구동각을 가지며 작은 토크를 요구하는 고관절 pitching 과 무릎관절 pitching 에는 회전형 구동기를 배치하여 사용자에게 따라 가변되는 링크부의 길이조절을 용이하도록 하였고, 상대적으로 큰 토크가 요구되며 관절의 구동각이 작은 발목 pitching 에는 직선형 구동기를 배치하였다. 착용식 외골격 로봇의 구조물은 아래와 같은 요건을 만족하도록 설계되어야 한다.

- 대상공정의 주요 관절 구동범위를 만족시키는 로봇의 관절 배치
- 요구동작을 수행할 수 있는 충분한 관절 토크 생성
- 다양한 크기의 사용자를 위한 길이조절 장치
- 가반하중, 자중 및 착용자의 체중을 지지할 수 있는 링크의 강성

이상의 과정을 통하여 선정된 상/하지부의 자유도 구성을 Fig. 7 에 나타내었다. 수동관절로 배치한 관절의 경우 완전한 수동관절로 선정할 경우 로봇의 자중 및 가반 하중이 인체에 큰 힘으로 작용하여 사용자에게 위험을 끼칠 수 있기 때문에 스프링 또는 댐퍼 등을 배치하여 특정 각도 이상

으로 동작할 경우 탄성력으로 복원할 수 있도록 반수동형(semi-passive) 관절로 배치하였다. 또한 구동기의 특징 및 동작분석 결과를 바탕으로 Table 4 와 같이 관절의 구동각을 제한하여 관절 구동범위를 벗어나는 구동각에 대하여 사용자를 보호하기 위하여 기구적 제한을 걸 수 있도록 설계하였다.

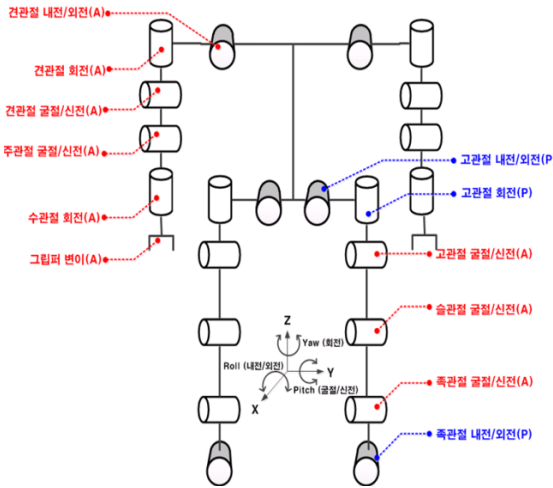


Fig. 7 Joint placement of exoskeleton robot

Table 4 Joint driving angle according to the placement degrees of freedom

Joint	DOF	Axis	Type	Range[deg.]	Remark
Shoulder	3	Roll	Active	0~120	Upper body 5x2=10 (Gripper excluded)
		Pitch	Active	-30~120	
		Yaw	Active	-60~60	
Elbow	1	Pitch	Active	0~120	
Carpal	1	Yaw	Active	-45~45	
Hip	3	Roll	Passive	-20~20	Lower body 6x2=12
		Pitch	Active	-15~75	
		Yaw	Passive	-30~30	
Knee	1	Pitch	Active	0~90	
Ankle	2	Pitch	Active	-35~35	
		Roll	Passive	-15~15	

3.2 외골격 로봇의 구조해석

설계된 외골격 로봇 하지부의 구조적 강성을 확인하기 위하여 상지부 중량 40kg 에 가반 하중

80kg 을 고려하여 상하지 체결부에 집중되는 것으로 가정하고 Inertia Relief 해석방법을 통해 구조해석을 실시하였다. 모듈간 체결은 힌지 고정으로 하였고 하중 적용 시 모든 힌지부는 잠금 상태가 되는 것으로 가정하였다. 하지로 내려오는 하중은 양 발에 고르게 분배된다는 가정 하에 좌측 다리에 대한 해석을 실시하였으며 Fig. 8 과 9 에 3D 모델과 해석을 위해 변환된 좌측다리의 FE 모델을 나타내었다.

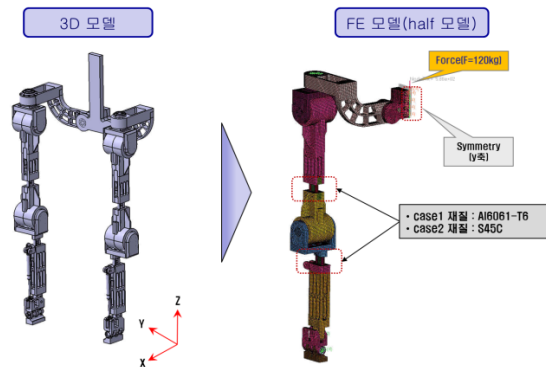


Fig. 8 FEM of exoskeleton structure

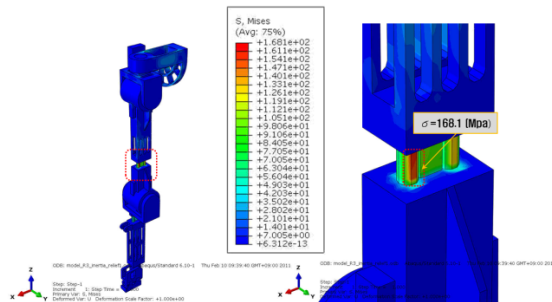


Fig. 9 Static structure analysis result

상기 Fig. 9 의 해석을 통해 주요 부위에 걸리는 최대응력 계산결과 예상과 같이 링크 길이 조절부의 강성이 취약함을 발견하였고, 이에 대한 보완으로 슬라이딩 가이드 부분의 재질을 AL6061-T6 에서 S45C 로 변경하거나 가이드의 굵기를 증가시키는 방법으로 구조적 취약 부분을 보완할 수 있는 것으로 분석되었다. 그 중 타 부품과의 호환성을 유지할 수 있는 첫 번째 대안인 재질 변경을 시행하게 되면 안전계수(Safety Factor)가 알루미늄을 사용하였을 때의 1.46 에서 2.67 로 증가되어 적정한 정적 안전성을 확보할 수 있다.

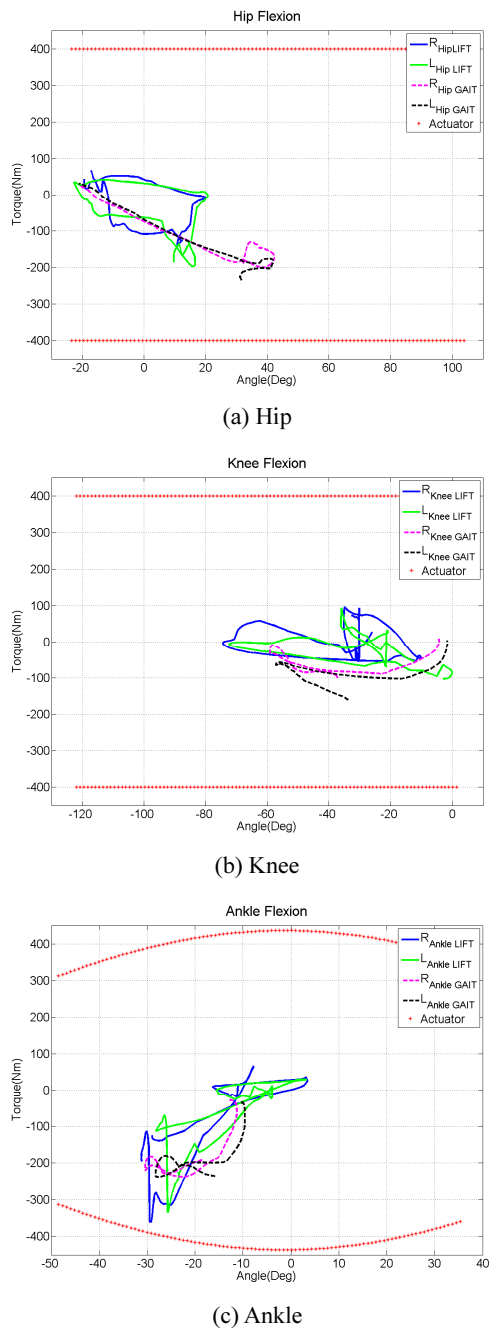


Fig. 10 Driving torque and actuator output torque w.r.t. driving angle

이상과 같이 로봇의 자유도를 배치하고 구동기를 선정 한 후 설계된 로봇의 강도해석을 실시하였다. 선정된 구동기를 통해 능동관절 구동기

의 구동 토크와 동작분석을 통하여 얻은 관절 구동각에 따른 소요 토크를 분석하였을 때 선정된 구동기는 요구 성능을 만족함을 확인할 수 있다(Fig. 10).

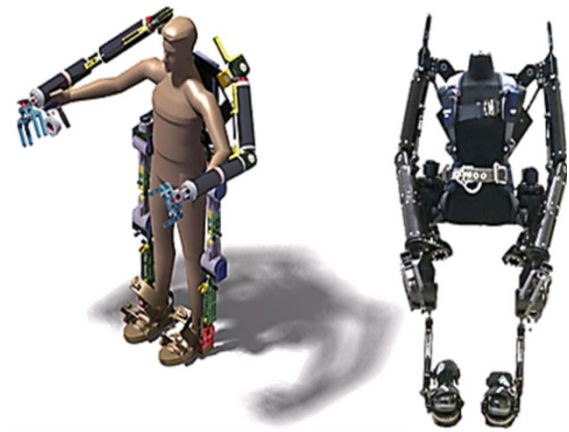


Fig. 11 The designed mock-up of industrial wearable robot

4. 결론

본 논문에서는 착용식 근력증강로봇을 산업현장에 적용하기 위하여 현장작업자를 대상으로 한 설문조사 및 현장 작업 실태를 분석하였다. 그 중 개선이 필요하며 착용식 근력증강 로봇을 적용 가능한 대상 작업을 선정하고 해당 작업을 모션캡처 장비를 통하여 동작을 분석하였다. 해당 작업을 세분화하여 각 작업간 요구되는 로봇의 자유도 및 요구 토크를 분석하여 외골격 로봇의 자유도 배치 및 적용 구동기를 선정하였다. 또한 설계된 기구물의 요구 강도조건 만족성을 검증하기 위하여 구조해석을 통해 안전성을 확인하였다. 이를 바탕으로 요구조건을 만족하는 외골격 기구부를 설계하여 착용성 및 구동성을 확인하기 위한 Mock-Up 시제를 제작(Fig. 11)하였고, 향후 선정된 구동기 및 센서류를 장착하여 산업현장에서 운용 가능한 착용식 근력증강로봇을 개발할 계획이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 로봇산업원천기술개발사업 [No.10035461, 산업노동지원을 위한 착용식 근력증강로봇 기술 개발]의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Zoss, A., Kazerooni, H. and Chu, A., "On the Mechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 3132-3139, 2005.
2. Kazerooni, H., Racine, J.-L., Huang, L. and Steger, R., "On the Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4353-4360, 2005.
3. Kazerooni, H., "The Human Power Amplifier Technology at the University of California, Berkeley," Journal of Robotics and Autonomous Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 179-187, 1996.
4. Ha, T.-J., Kim, D. J., Kim, S. H. and Lee, J. Y., "Augmentative Exoskeleton Structure Design Based on Working Motion Analysis," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 295-296, 2011.
5. Jang, J. H., Lee, H. D., Jang, H. Y., Han, J. S., Han, C. S. and Shon, W. H., "Development of Wearable Robot System based the Analysis of the Lower Limbs," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 7, pp. 7-14, 2009.
6. Raytheon, http://www.raytheon.com/newsroom/technology/rtn08_exoskeleton/
7. Missiles and Fire Control, Lockheed Martin, HULC, <http://www.lockheedmartin.com/products/hulc/>
8. Kawamoto, H. and Sankai, Y., "Power Assist System HAL-3 for Gait Disorder Person," Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2398, pp. 19-29, 2002
9. Lee, S. and Sankai, Y., "Power Assist Control for Walking Aid with HAL-3 Based on EMG and Impedance Adjustment around Knee Joint," IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 1499-1504, 2002.
10. Honda, <http://corporate.honda.com/innovation/walk-assist/>