

# 고하중물 취급 작업 동작분석을 통한 착용식 로봇의 설계

하태준<sup>1†</sup> 김회동<sup>2</sup> 김영수<sup>3</sup>

## 내용목차

1. 서론
2. 적용대상 공정 및 작업환경 분석
3. 모션캡처 장비를 이용한 동작 분석
4. 착용식 로봇 외골격 구조 설계
5. 결론

---

1† 현대로템(주) 기술연구소 제어연구팀

(교신저자 Tel: 031-596-9609 Fax: 031-596-9748 E-mail: taejun@hyundai-rottem.co.kr)

2 현대로템(주) 기술연구소 제어연구팀 팀장

3 현대로템(주) 기술연구소 중기연구부문 부문장

논문접수일: 2012년 4월 24일 게재확정일: 2012년 7월 5일

논문수정일: (1차: 2012년 6월 8일, 2차: 2012년 6월 26일)

## Wearable Robot Design by Heavy Load Handling Motion Analysis

Ha, Tae Jun<sup>1†</sup> Kim, Hoi Dong<sup>2</sup> Kim, Young Soo<sup>3</sup>

### Abstract

Ever since, various studies have come up with ideas to improve the physical abilities of man. Just recently, a new technology has been introduced to either replace or complement the human work force. In this paper, the status of developed wearable robots is being investigated as studies were conducted to apply the types of robots applicable to the industry. To apply wearable exoskeleton robot, which enhances the physical capability of humans, the driving range of the robot's degrees of freedom were selected by analyzing working motion. The design process for augmentative exoskeleton structure is presented by analyzing the required torque and power during a selected working motion. At the end of this paper, a mock-up is introduced to validate the feasibility of the designed robot.

*<Keywords> Wearable robot, exoskeleton, structure design, working motion analysis, industrial application*

## 1. 서론

인간의 능력을 향상시키기 위한 인체 착용형 외골격 로봇 관련하여 많은 선행연구가 과거로부터 활발하게 이루어져 왔고 최근에 들어 실제 적용 가능한 수준의 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 XOS[6]는 버전1에 이어 최근 버전2를 공개하였으며 전신 착용형 외골격 로봇이다. 자체중량이 68kg인 XOS는 외부의 유압동력원으로부터 동력을 공급받아 운용되며 가만하중 84kg, 최대 보행속도는 5.8km/h라고 보고되었다.

또 다른 선두주자라 할 수 있는 Lockheed Martin社의 HULC[7]는 하지의 운동만을 보조하며 약70kg의 가만 하중 하에서 동작이 가능하다고 발표되었다. 독자적인 동력원(Hybrid electro-hydraulic power)을 사용하여 약 17시간의 운용시간을 보인다. HULC는 미군의 빠른 기동력을 위해 개발되었으며 현재 다양한 용도(하이킹, 환자보조 등)로 변형, 개발되고 있다.

마지막 대표주자인 CyberDyne社의 외골격 수트 HAL[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 XOS와 HULC는 병사용 로봇으로 개발되어 산업용으로 사용하기에는 용도가 적당하지 않고 HAL은 환자 또는 노약자를 위하여 개발되었기 때문에 착용자의 동작의도 획득을 담당하는 HRI에 사용되는 EMG(Electromyography)센서는 생산공정 작업자에 적용하기에는 어려움이 있다. 앞서 언급되지는 않았지만 산업용으로 개발된 혼다社의 보행보조 장치(WAD[10] - 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 힘 증강 로봇 시스템의 개발이 시급한 실정이다.



<그림 1> 착용식 로봇 개발 사례

## 2. 적용대상 공정 및 작업환경 분석

개발이 요구되는 착용식 외골격 로봇의 현장적용을 위하여 방산업체 생산공장 현장분석을 실시한 결과를 아래 <표 1>과 <그림 2>에 나타내었다. 근골격계 질환의 주요 유해요인인 부자연스러운 자세 및 과도한 힘을 사용하는 작업이 개선되어야 할 작업으로 선정되었으며 본 연구에서는 25kg이상의 중량물을 취급하는 작업, 부자연스런 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 증대시켜주는 로봇의 개발을 목표로 선정하였다.

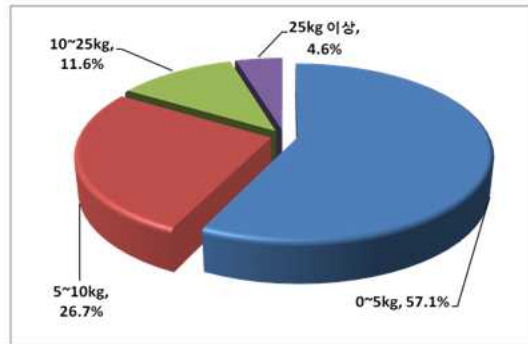
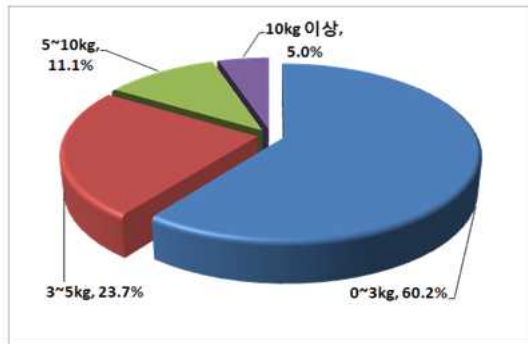
<표 1> 현장작업자를 대상으로한 작업유형 통계

주요작업	선택수	비율(%)
1. 팔, 손/손목, 손가락을 사용하는 잦은 반복적인 움직임이 있는 작업	1,063	15.5
2. 허리를 구부리거나 비틀어서 하는 작업	829	12.1
3. 목을 구부리거나, 뒤로 젖히거나 비틀어서 하는 작업	713	10.4
4. 장시간 앉아서 하는 작업	688	10.0
5. 무릎을 꿇거나 쪼그려 앉아서 하는 작업	651	9.5
6. 장시간 서서 하는 작업	558	8.1
7. 팔이나 손을 길게 뻗어서 하는 작업	545	7.9
8. 팔이 어깨 높이나 그 위에서 하는 작업	423	6.2
9. 중량물을 들어 올리는 작업	385	5.6
10. 몸을 앞으로 구부리거나 기대서 하는 작업	370	5.4
11. 중량물을 밀거나 당기는 작업	325	4.7
12. 장시간 진동발생 공구(망치, 그라인더, 임팩트 등)를 사용하는 작업	306	4.5

고하중물 취급 작업 동작분석을 통한 착용식 로봇의 설계

장비/치공구 중량	0~3kg	3~5kg	5~10kg	10kg 이상
선택수(명)	1063	418	196	88
점유율(%)	60.2	23.7	11.1	5.0
취급시간 평균	4.7 시간			

부재/자재 중량	0~5kg	5~10kg	10~25kg	25kg 이상
선택수(명)	995	465	203	80
점유율(%)	57.1	26.7	11.6	4.6
취급시간 평균	4.1 시간			



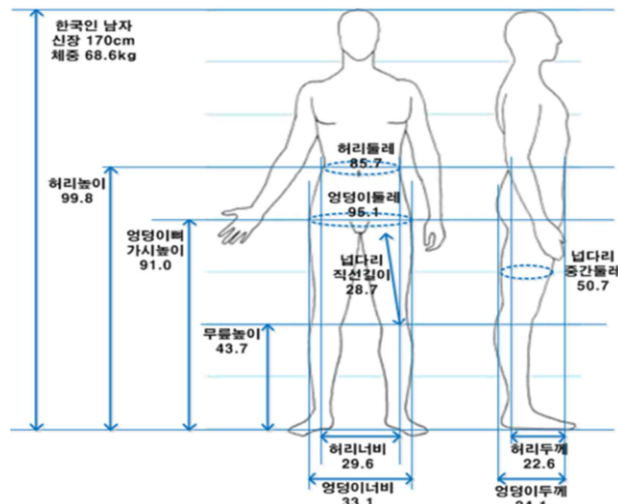
a) 사용 치공구 중량 분포

b) 취급 자재 중량 분포

<그림 2> 생산현장 작업공정 분석

착용식 외골격 로봇의 설계 치수를 산정하기 위하여 상기 언급된 공정을 수행하는 현장 작업자의 평균 신체사이즈를 현장작업자 2,066명에 대하여 분석 결과 평균 47.1세 연령과 170.2cm의 평균 신장, 그리고 68.6kg의 몸무게(<그림 3>)를 나타내었다.

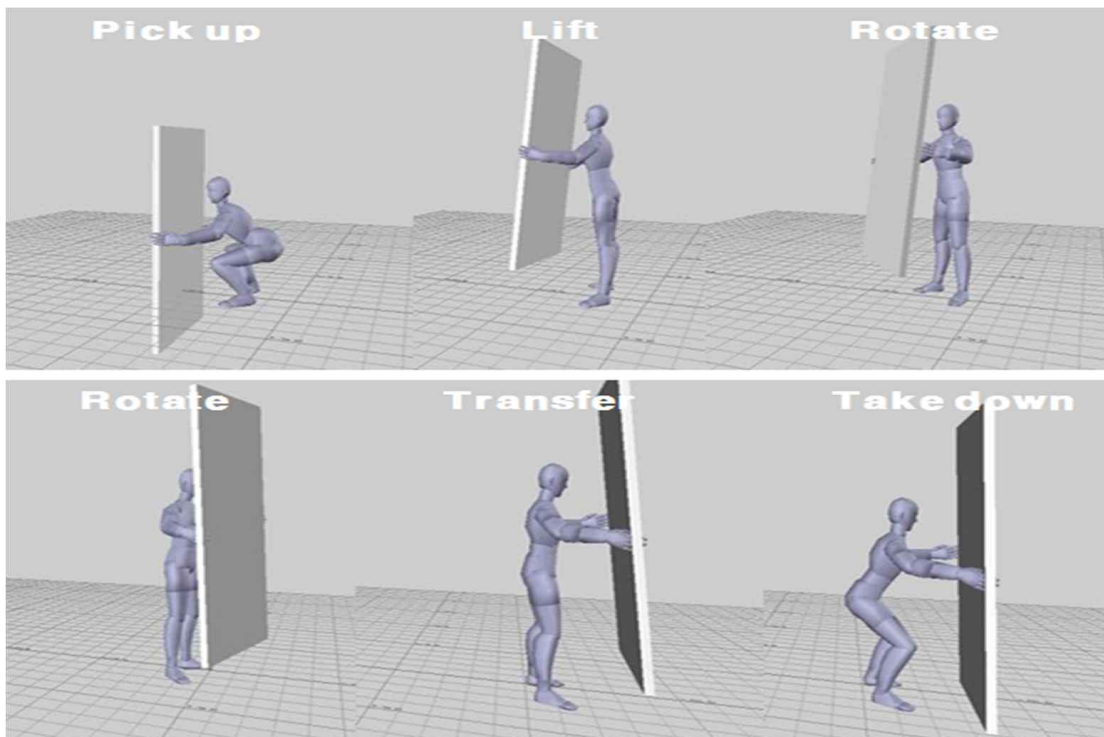
이와 같은 작업자들의 다양한 대상 공정중 개선이 우선시 된다고 판단되는 고부하 하중물 조립작업을 선정하였다. 대상 작업은 현재 3인이 협동 작업을 하여야 하며 취부 작업에도 상당시간이 소요되어 작업공정 개선 시 생산량 증가로 이어질 수 있는 작업으로 판단하였다.



<그림 3> 한국 성인 남성의 평균 신체 크기

### 3. 모션캡처 장비를 이용한 동작 분석

선정된 작업 간 인체의 관절 운동 범위를 파악하기 위하여 카메라를 이용한 모션캡처 장비를 이용하였다. 측면 도어의 취부 작업은 파지, 양중, 회전, 이송, 장착의 5가지 동작 (<그림 4>)으로 세분화 할 수 있고 해당 작업을 수행하며 작업간 주요 관절의 구동각 및 관절 소요 토오르크를 지면에 장착된 force-plate에서 측정된 지면 반력과 모션캡처 카메라와의 연동을 통해 주요 근육의 근력과, 반력, 관절 토크등을 인체 역동역학 해석 소프트웨어(AnyBody Modeling System TM)를 이용, 15kg의 모의치구를 통한 시험 결과를 40kg 가반하중에 대한 관절별 구동각에 따른 소요 토오르크를 예측하였다. 이때 측정된 주요 관절의 구동각을 아래 <표 2>에 나타내었다. 측정된 관절의 구동각을 통하여 외골격 구조물의 기구학적 구동범위를 제한하고 자중 및 가반하중에 대한 강도 해석을 통하여 링크부 설계에 반영하도록 한다.



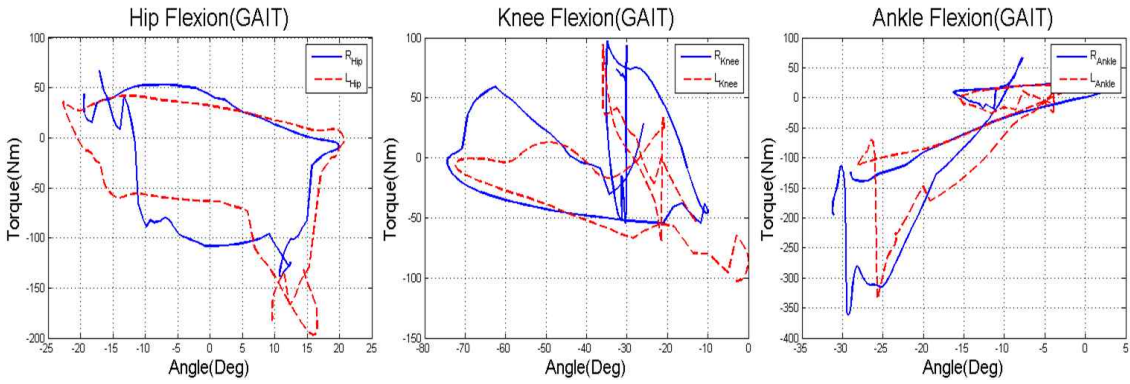
<그림 4> 대상공정 동작 세분화

<표 2> 선정된 작업 동작간 주요 관절의 구동각 분석

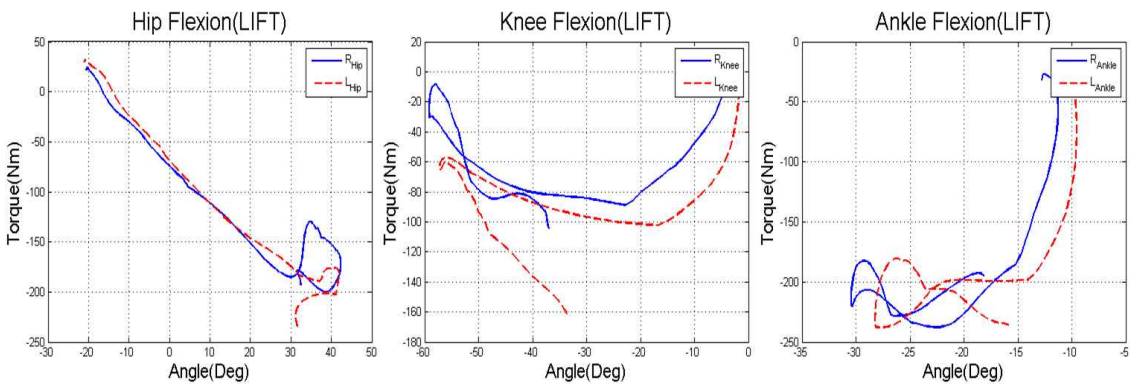
	세로 양중동작		가로 양중동작	
	최대	최소	최대	최소
고관절 굴절(좌)	124.7	-2.3	33.4	-0.87
고관절 굴절(우)	127.8	-5.8	<b>34.2</b>	-3.92
무릎관절 굴절(좌)	-3.73	-132.0	-42.6	-3.73
무릎관절 굴절(우)	-6.30	-133.1	-41.1	-7.17
발목관절 굴절(좌)	64.36	<b>1.34</b>	27.5	8.75
발목관절 굴절(우)	59.52	2.83	24.6	5.98
	보행 및 이송 동작		취부 동작	
	최대	최소	최대	최소
고관절 굴절(좌)	21.4	<b>-18.6</b>	31.05	-0.35
고관절 굴절(우)	20.5	-16.8	32.89	-6.99
무릎관절 굴절(좌)	<b>0.07</b>	<b>-68.79</b>	-4.17	-29.29
무릎관절 굴절(우)	-2.31	-68.03	-5.26	-40.13
발목관절 굴절(좌)	<b>31.87</b>	8.55	24.06	11.77
발목관절 굴절(우)	30.69	2.70	22.61	4.39

상기 <표 2>와 같이 분석된 대상공정 수행간 주요 관절의 구동각도를 보면 고관절 pitching 회전은 127.8°에서 -18.6°의 각도로 구동각을 보이고 무릎관절 pitching은 0.07°에서 -133.1°의 구동각 범위를 보인다. 발목관절의 경우 64.36°에서 1.34°의 구동각 범위가 측정되었다. 상기 시험에서는 대상물체(고부하 하중물)를 가로로 눕힌 상태(Pick Up 0)와 세로로 세운상태(Pick Up 90)의 두 가지 경우에 대하여 측정하였으며 시험결과를 바탕으로 대상 작업물은 세로로 세운 상태에서 양중 하는 것이 로봇관절 구동에 적합하다 판단되어 세로 양중동작은 생략하게 되었다. 결과적으로 고관절 pitching은 34.2°에서 -18.6°, 무릎관절 pitching은 0.07°에서 -68.79°, 발목관절 pitching은 31.87°에서 1.34°의 범위에서 구동할 수 있도록 로봇 설계의 참고치수로 선정하게 되었다.

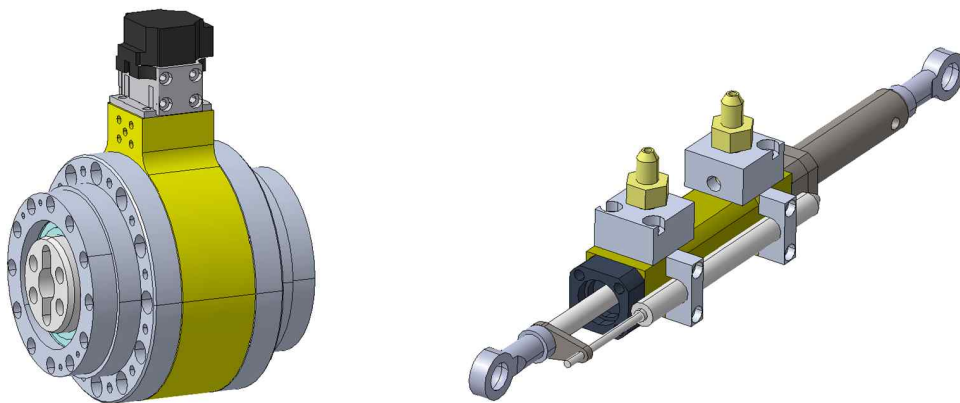
또한 대상 작업공정 수행간 구동기의 요구 성능을 파악하기 위하여 모션캡처 장비와 연동된 force plate에 측정되는 지면반력을 인체 역동역학을 통해 관절 구동각에 따른 소요 토크를 예측하였고 그에 따른 결과를 아래 <그림 5>와 <그림 6>에 나타내었다. 소요 토크는 이송동작과 양중동작에 대하여 분석하였으며 보행간 고관절, 무릎관절, 발목관절 pitching방향에 대한 결과 그래프를 도시하였다. 이에 따라 관절에 따른 소요 토크를 만족시키도록 외골격 로봇의 구동기가 설계 배치되어야 한다.



<그림 5> 보행간 주요 관절의 구동각과 그에 따른 소요 토크 분석



<그림 6> 양중간 주요 관절의 구동각과 그에 따른 소요 토크 분석



a) 회전형 유압 구동기                      b) 직선형 유압구동기

<그림 7> 회전형 유압구동기와 직선형 유압구동기 형상

큰 가반하중에 대응하기 위하여 본 연구에서는 공급압력 조절을 통한 출력힘 또는 출력 토크를 조절하기가 용이한 유압식 구동기를 사용하도록 하였다. 유압식 구동기는 크게 회전형(<그림 7 a>)과 직선형(<그림 7 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 누유 되는 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 회전관절에서의 출력 토크가 달라지는 단점이 있다. 또한 사용자에게 따른 링크길이 조절이 불가결한 착용식 로봇에서 길이조절이 가능하도록 하는 데에는 부수적인 메커니즘이 추가되어야 하는 단점이 있다.

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

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

<표 3> 주요 구동 관절의 구동각과 관절 구동특징에 따른 유압 구동기 선정

항목	고관절 피칭	무릎관절 피칭	발목 피칭
구동각 범위	$-25 < \theta_h < 65$	$-90 < \theta_k < 0$	$-35 < \theta_a < 35$
소요토크 범위	$-200 < \tau_h < 70$	$-160 < \tau_k < 100$	$-350 < \tau_a < 70$
특징	큰 구동각 큰 소요토크	큰 구동각 큰 소요토크	작은 구동각 큰 토크
구동기 선정	회전형	회전형	직선형

## 4. 착용식 로봇 외골격 구조 설계

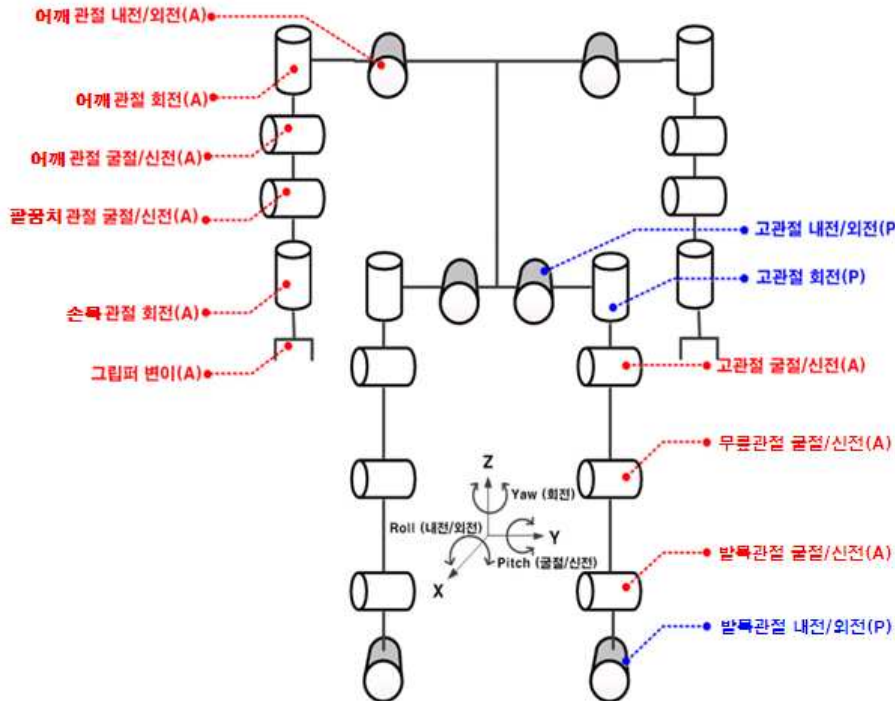
### 4.1 외골격 로봇의 자유도 및 구동기 선정

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 3자유도, 무릎 1자유도, 발 및 발목 2자유도로 하지부에서는 총 12자유도의 동작이 발생하고, 그 중 상대적으로 큰 토크가 소

요되는 관절은 고관절 pitching, 무릎 pitching, 발목 pitching 관절로 총 6개의 능동관절로 구성하도록 하고 나머지 6개의 관절을 수동형 관절로 구성하여 하지부 관절배치를 하였다. 또한 능동관절 중 상대적으로 큰 구동각을 가지며 작은 토크를 요구하는 고관절 pitching과 무릎관절 pitching에는 회전형 구동기를 배치하여 사용자에게 따라 가변되는 링크부의 길이조절을 용이하도록 하였고, 상대적으로 큰 토크가 요구되며 관절의 구동각이 작은 발목 pitching에는 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

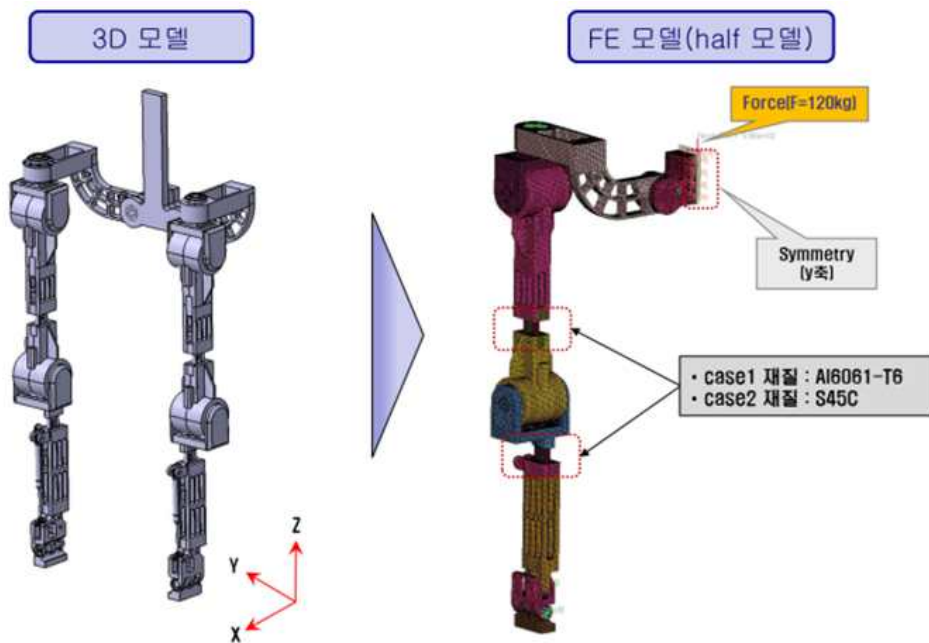
이상의 과정을 통하여 선정된 상/하지부의 자유도 구성을 <그림 8>에 나타내었다. 수동관절로 배치한 관절의 경우 완전한 수동관절로 선정할 경우 로봇의 자중 및 가반 하중이 인체에 큰 힘으로 작용하여 사용자에게 위험을 끼칠 수 있기 때문에 스프링 또는 댐퍼 등을 배치하여 특정 각도 이상으로 동작할 경우 탄성력으로 복원할 수 있도록 반수동형(semi-passive) 관절로 배치하였다. 또한 구동기의 특징 및 동작분석 결과를 바탕으로 <표 4>와 같이 관절의 구동각을 제한하여 관절 구동범위를 벗어나는 구동각에 대하여 사용자를 보호하기 위하여 기구적 제한을 걸 수 있도록 설계하였다.



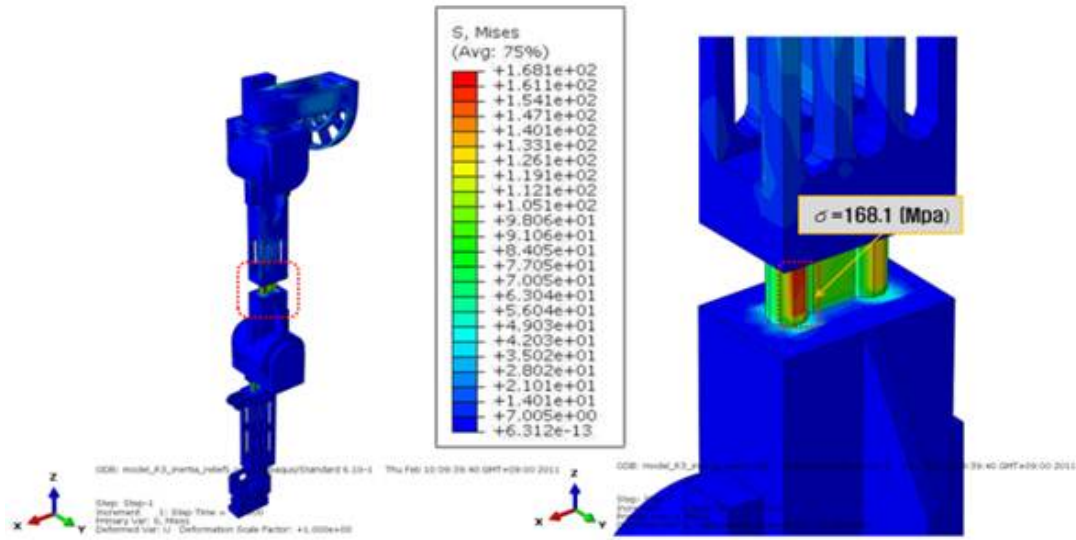
<그림 8> 외골격 로봇의 관절 배치

<표 4> 자유도 배치에 따른 주요 구동관절의 구동각

관절	자유도	회전축	능동/수동	구동각[deg.]	비고
어깨관절	3	Roll	능동	0~120	상지 10자유도 (그리퍼제외)
		Pitch	능동	-30~120	
		Yaw	능동	-60~60	
팔꿈치관절	1	Pitch	능동	0~120	
손목관절	1	Yaw	능동	-45~45	
고관절	3	Roll	수동	-20~20	
		Pitch	능동	-15~75	
		Yaw	수동	-30~30	
무릎관절	1	Pitch	능동	-90~0	
발목관절	2	Pitch	능동	-35~35	
		Roll	수동	-15~15	



<그림 9> 외골격 구조물의 유한요소 해석 모델



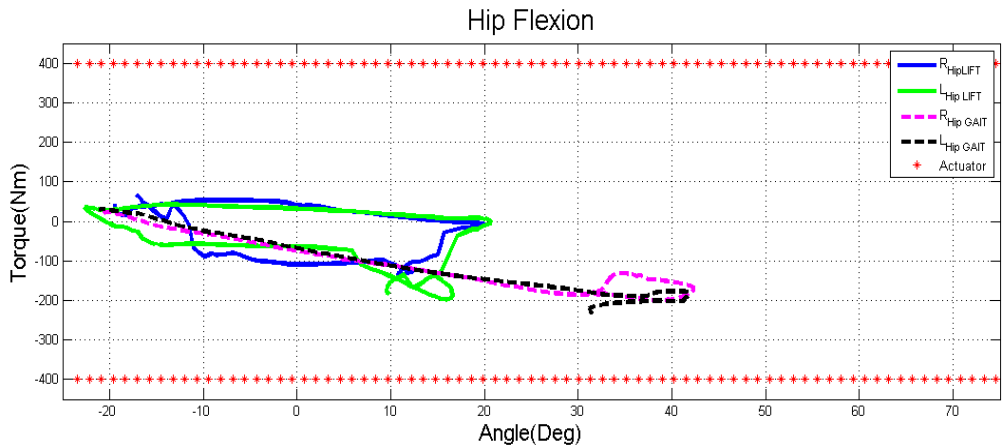
<그림 10> 외골격 구조물의 구조해석 결과

## 4.2 외골격 로봇의 구조해석

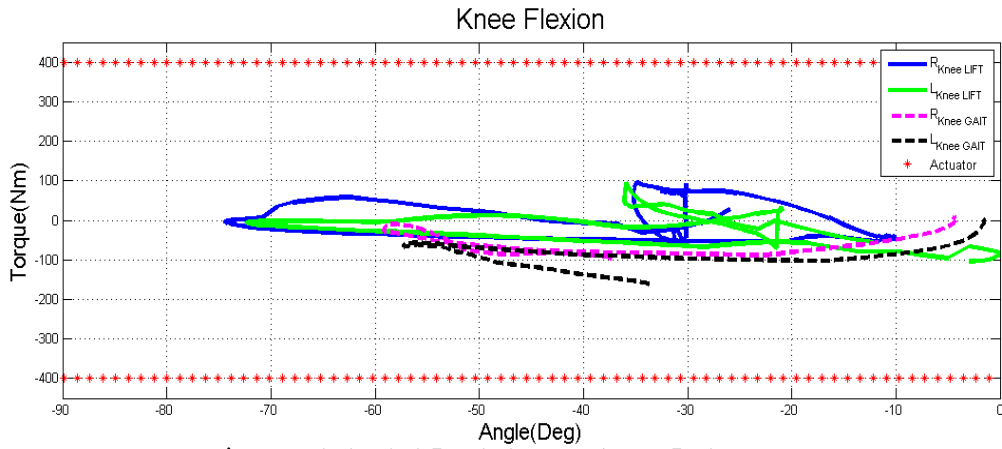
설계된 외골격 로봇 하지부의 구조적 강성을 확인하기 위하여 상지부 중량 40kg에 가반 하중 80kg을 고려하여 상하지 체결부에 집중되는 것으로 가정하고 Inertia Relief 해석방법을 통해 구조해석을 실시하였다. 모듈간 체결은 힌지 고정으로 하였고 하중 적용 시 모든 힌지부는 잠금 상태가 되는 것으로 가정하였다. 하지로 내려오는 하중은 양 발에 고르게 분배된다는 가정 하에 좌측 다리에 대한 해석을 실시하였으며 <그림 9>와 <그림 10>에 3D모델과 해석을 위해 변환된 좌측다리의 FE모델을 나타내었다.

위의 <그림 10>의 해석을 통해 주요 부위에 걸리는 최대응력 계산결과 예상과 같이 링크 길이 조절부의 강성이 취약함을 발견하였고, 이에 대한 보완으로 슬라이딩 가이드 부분의 재질을 AL6061-T6에서 S45C로 변경하거나 가이드의 직경을 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 1.46에서 2.67로 증가되어 적정한 정적 안전성을 확보 할 수 있다. 동적인 상황에서의 구조적 강도를 예상하였을 때 본 시스템이 적용되는 저속운용의 상황에서는 정적 안전계수의 2/3배를 적용하여 동적 안전계수는 1.78로 목표안전계수 1.5를 상회하도록 선정하였다.

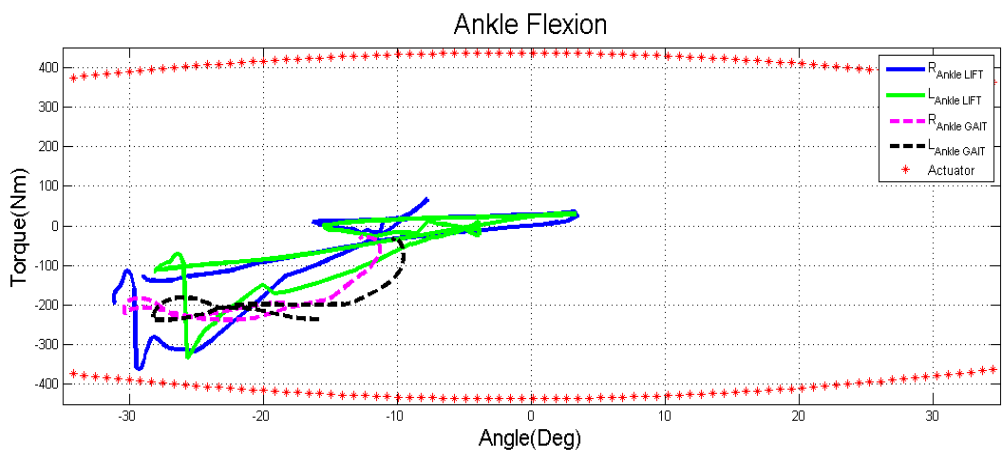
이상과 같이 로봇의 자유도를 배치하고 구동기를 선정된 후 설계된 로봇의 강도해석을 실시하였다. 선정된 구동기를 통해 능동관절 구동기의 구동 토크와 동작분석을 통하여 얻은 관절 구동각에 따른 소요 토크를 분석하였을 때 선정된 구동기는 요구 성능을 만족함을 확인할 수 있다. (<그림 11>)



a) 고관절 피칭축 관절 구동각 vs 출력 토오크



b) 무릎관절 피칭축 관절 구동각 vs 출력 토오크

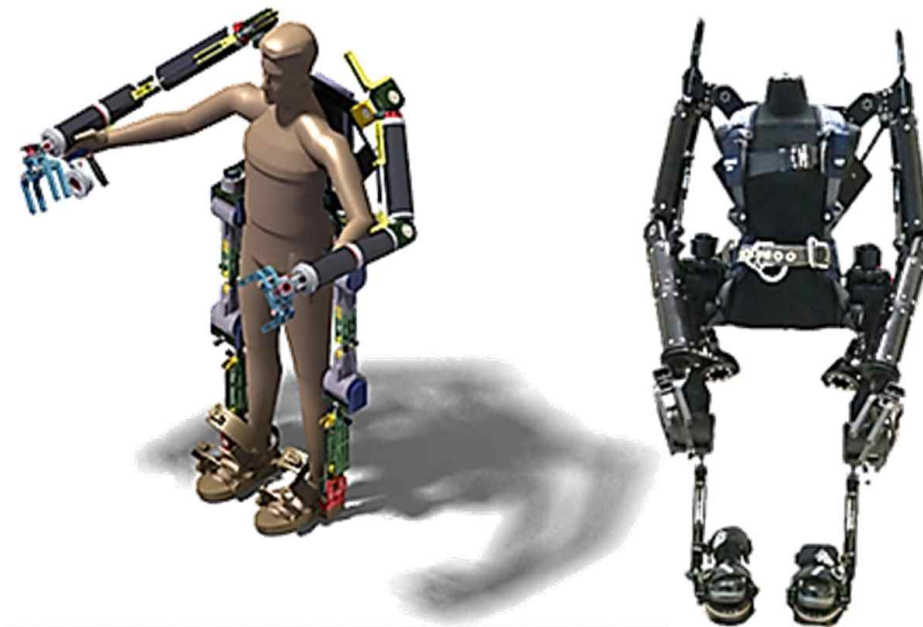


c) 발목관절 피칭축 관절 구동각 vs 출력 토오크

<그림 11> 설계된 외골격 로봇의 관절 구동각에 따른 출력 토오크 곡선

## 5. 결론

본 논문에서는 착용식 로봇을 고부하 하중물을 취급 조립하는 방산업체 공장작업에 적용하기 위하여 현장작업자를 대상으로 한 설문조사 및 현장 작업 실태를 분석하였다. 그 중 개선이 필요하며 착용식 외골격 로봇을 적용 가능한 대상 작업을 설문을 통하여 분석한 뒤 선정하고 해당 작업을 모션캡처 장비를 통하여 동작을 분석하였다. 동작 분석 작업에서는 해당 작업을 세부 동작별로 구분하여 각 작업간 요구되는 로봇의 자유도 및 요구 토크를 산출하여 외골격 로봇의 자유도 배치 및 적용 구동기를 선정에 참고 자료로 활용하였다. 이를 바탕으로 선정된 관절 배치를 위한 링크 구조물을 다양한 작업자의 신체 크기에 대응할 수 있도록 설계하고 그에 대한 구조해석을 통해 기구적 강인성을 확인하였다. 이와 같은 해석, 설계 과정을 통해 선정된 작업을 수행하는 작업자를 위한 외골격로봇을 검증하고 이에 대한 구동성, 착용성 및 적합성을 확인하는 목업 시제를 제작하여 그에 대한 적합성을 확인하였다. 향후 개발되는 시제에는 실제 유압 구동기 및 로봇자세 측정센서 및 착용자 동작의도 획득 센서를 배치하여 최종적으로 고부하 하중물 취급작업간 작업자가 이에 대한 하중을 느끼지 않고 일에 대한 피로도를 줄일 수 있는 착용식 로봇을 개발, 제작할 계획이다.



<그림 12> 공장 작업지원을 위한 외골격로봇의 디자인 목업 형상

## 참고문헌

- [1] 하태준, 김대제, 김석환, 이정엽, “현장작업 분석을 통한 근력증강로봇의 외골격구조설계”, 『2011 한국정밀공학회 춘계 학술대회』, pp.295-296, 2011.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Kazerooni, H., “The Human Power Amplifier Technology at the University of California, Berkeley”, Journal of Robotics and Autonomous Systems, Elsevier, Vol. 19, pp. 179-187, 1996.
- [5] Jang, J. H., Lee, H. D., Jang, H. Y., Han, J. S., Han, C. S., Shon, W. H., “Development of Wearable Robot System based the Analysis of the Lower Limbs”, Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 26, No. 7, pp. 7-14, 2009.
- [6] Raytheon, [http://www.raytheon.com/newsroom/tech-nology/rtn08\\_exoskeleton/](http://www.raytheon.com/newsroom/tech-nology/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. 2398/2002, 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”, In Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1499-1504, 2002.
- [10] Honda, <http://corporate.honda.com/innovation/walk-assist/>