

대한기계학회 주선

제10회 전국학생설계경진대회(2020년)

설계 최종 보고서

참가부	대학부 (O)				
참가분야	공모주제 (O) / 자유주제 ()				
참가팀명	CLOSERS				
설계제목	고령자 및 편마비 환자를 대상으로 강력파지 동작에 최적화된 양방향 외골격 보조장치의 개발				
지도교수/교사	(소속)한동대학교 (성명)김재호 (이메일)jhkim@handong.edu				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	황병곤	한동대학교 기계제어공학부			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	황병곤	한동대학교/4학년	21400821@handong.edu
2	유정현	한동대학교/4학년	21500432@handong.edu
3	신지은	한동대학교/4학년	21500375@handong.edu
4			
5			
6			

설계 요약문

참가분야	공모주제 (O) / 자유주제 ()
참가팀명	CLOSERS
설계제목	고령자 및 편마비 환자를 대상으로 강력파지 동작에 최적화된 양방향 외골격 보조장치의 개발
대표자명	황병곤
요약문	설계배경 현재 한국에서 빠른 속도로 진행 중인 고령화는 악력 저하를 포함한 손의 기능저하를 유발하며 뇌질환의 발병률 증가를 동반하고 있다. 뇌졸중으로 발생하는 편마비는 뇌의 손상으로 인해 신체의 일부가 뇌의 전기적 신호를 전달받지 못해 생기는 현상이다. 특별히 신체장애로 인한 손의 기능 저하는 일상생활의 삶의 질(Quality of Life)에 치명적인 영향을 미친다. 이처럼 저하된 손의 기능을 회복하는 것은 삶의 질을 향상시키는 것으로 간주될 만큼 중요한 치료 목적중 하나이다. 따라서 이번 설계에서는 일상생활에서 가장 흔히 쓰이는 손의 쥐는 동작에 최적화 하여 사용자의 부담을 줄이고 다양한 환경에 적용될 수 있는 사용자 친화적인 RTbot을 설계하는 것을 목표로 한다. 설계내용 RTbot은 3D 모델링을 통해 설계되었으며, 각각의 부분은 힘의 전달률 및 사용자 편의성을 고려하여 PLA, TPU, 실리콘을 소재로 제작되었다. RTbot은 내,외전 양방향 모두 보조가 가능하다. 정량적인 힘 데이터의 계측을 통해 환자에게 피드백을 제공하며, 치료사의 환자 평가를 보조할 수 있다. 엄지의 위치제어 및 힘의 세기 조절을 통해 다양한 물체에 대응하여 파지동작으로 보조 하고, IoT 시스템을 활용한 제어방식을 통해 사용자의 편의성을 증가시켰다. 설계결과 이번 설계를 통해 보조 악력 10[N] 이상, MCP ROM 40[degree] 이상의 성능을 보이는 장비를 설계하였다. 본 설계의 결과로 제작된 장비를 이용하여, 500ml 물병, 작은 음료수 캔, 전동 칫솔 두께의 드라이버, 삶은 달걀 이상 4개의 일상생활 속 물체의 파지가 가능한 것을 확인하였다. 보조 악력의 크기가 조절 가능하여 경도가 약한 달걀부터 500g 이상의 물병까지 대응이 가능한 것을 확인하였다. 또한 일련의 과정들을 개발한 IoT 시스템을 통해 진행했다는 점에서 사용자의 편의성이 증가 하였다. 마지막으로 MATLAB과 DAQ를 통해 정량적인 힘 데이터를 확인함으로써 치료사 및 환자를 대상으로 정확한 피드백이 가능하다. 기대효과 RTbot은 기존 제품 대비 적은 가격과 사용자 편의성을 바탕으로 대중적인 사용이 가능할 것으로 예상되며, 정량적인 힘 데이터의 계측을 바탕으로 다양한 연구분야의 개척에 도움이 될 것으로 생각된다.
설계프로젝트의 입상 이력	해당사항 없음

고령자 및 편마비 환자를 대상으로 강력과지 동작에 최적화된 외골격 보조 장치의 개발

황병곤* 유정현* 신지은** 김재효*

*한동대학교 기계제어공학부

**한동대학교 콘텐츠융합디자인학부

Development of power grip optimized exoskeleton device for the elderly and hemiplegia patients.

Jeong-Hyun Yoo*, Byung-gon Hwang*, Ji-eun Shin* Jae-hyo Kim*

* School of Mechanical and Electric Control Engineering, Handong Global University

** School of Contents Convergence Design, Handong Global University

Key Words: Grip Assistance Device(악력 보조 장치), Exoskeleton Device(외골격 장비), IoT System(사물인터넷), Quantitative Data Instrumentation(정량적 데이터 계측), Stress Analysis(응력 분석), Hemiplegia Patient(편마비 환자), Elderly Aids(노인 보조 기구)

초록: 이번 설계는 고령자 및 편마비환자를 대상으로 하는 양방향 외골격장치의 설계이다. 사용빈도수가 높은 과지동작을 선정함으로써 장비의 부피, 무게, 제작단가를 낮췄으며, 엄지의 위치제어 및 과지동작시 힘의 단계조절을 통해 일상생활 속 활용도를 증가시켰다. 장비는 최대 힘 10[N], 최대 ROM 30[degree]의 성능을 가지며, CATIA 기반의 3D모델링을 활용하여 설계를 진행하였다. 장비의 각 부분은 용도에 따라 PLA, TPU, 실리콘 소재를 활용하여 제작되었다. IoT 시스템을 활용해 장비를 제어함으로써 사용자의 편의성을 증가 및 기능 확장성이 뛰어나다. 정량적인 힘데이터의 측정을 통해 사용자 피드백 및 치료사의 판단을 보조할 수 있다. 고령자의 비율 및 뇌질환 발병률이 증가하는 현 상황 속에서 본 제품은 경제적, 복지적, 연구적인 측면에서 의미를 가질 것으로 예상된다.

Abstract: This Device is a bi-direction exoskeleton device for the elderly and hemiplegia patients. By limiting the function of device, we reduced the price, volume, weight of device. The device is designed with CATIA 3D modeling program, and made of PLA, TPU and silicon. The device is controlled by cellphone application with Bluetooth communication. By IoT system, User convenience and function extensibility is increased. Measurements of quantitative force data can assist user and therapist feedback. In aging world, This product is expected to be meaningful in terms of economics, welfare and research filed.

1. 서 론

대한민국은 고령화 사회로 접어들고 있다. 현재 대한민국 인구의 14.9%가 고령자(65세 이상)이며 2067년이 될 경우 이 비율은 46.5%까지 증가하게 된다⁽¹⁾. 고령자에게 흔히 발생하는 뇌질환의 경우 고령노인에게 치명적이다. 국민건강보험의 조사에 따르면 65세 이상의 고령자중 입원 다발생 질병의 4위가 뇌경색증이다⁽²⁾. 고령자에게 자주 발생하는 질병인 뇌관련 질환들의 경우 의료기술의 발달로 이전에 비해 사망률이 감소하고 있다. 결과적으로 뇌졸중 이후 생존하는 사람이 증가함에 따라 뇌졸중 이후 관리의 중요도는 증가하는 추세이다⁽³⁾.

† Corresponding Author, jhkim@handong.edu

© 2020 The Korean Society of Mechanical Engineers

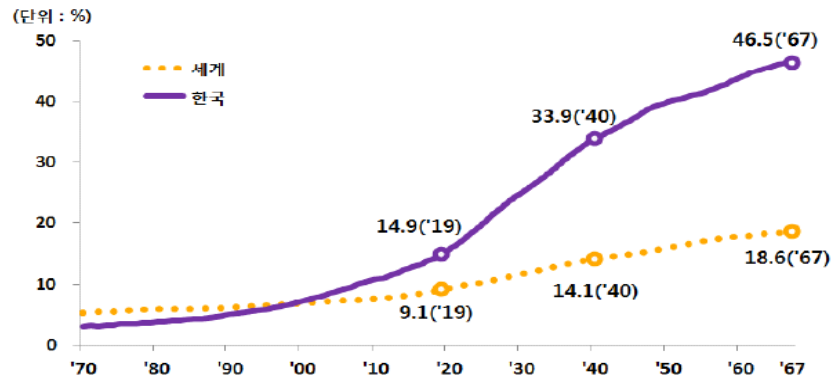


Fig. 1 Trend of the elderly population in world and Korea⁽¹⁾

[2017년 65세 이상 노인 입원 다발생 질병 순위]

(단위: 명, 백만원)			
순위	질 병 명	진료인원	진료비
1	노년백내장(H25)	207,994	270,188
2	알츠하이머병에서의치매(G30.-+)(F00)	103,892	1,375,485
3	상세불명병원체의폐렴(J18)	96,254	361,809
4	뇌경색증(I63)	77,217	793,743
5	무릎관절증(M17)	71,419	509,098
6	기타척추병증(M48)	61,932	164,658
7	요추및골반의골절(S32)	54,086	146,904
8	협심증(I20)	50,607	216,695
9	감염성및상세불명기원의기타위장염및결장염(A09)	49,945	56,320
10	늑골,흉골및흉추의골절(S22)	49,290	112,153

주) 수진기준, 순위는 진료인원 순

Fig. 2 Rank of diseases causing hospitalization of elderly population in Korea⁽²⁾

편마비(Hemiplegia)는 후 뇌졸중의 대표적인 증상이다. 이러한 편마비는 삶의 질(Quality of Life)에 여러 가지 악영향을 미치는데 그중 대표적인 원인이 바로 손의 기능 저하이다. 보건복지부가 고시한 ‘장기요양 등급판정 기준표’를 살펴보면 기본적 일상생활 기능 12항목 중 절반가량의 항목이 손의 기능과 밀접한 연관이 있는 것을 알 수 있다. 이를 통해 손의 기능이 일상생활에서 큰 영향력을 가지고 있음을 알 수 있다.

편마비로 인해 떨어진 손의 기능을 위해서는 재활치료가 필수적이다. 재활치료의 경우 크게 물리치료와 작업치료로 나눌 수 있다. 물리치료의 경우 전문 치료사가 시행하며 근 긴장도를 떨어트려 손의 경직도를 완화하는 것을 목표로 한다. 이러한 물리치료는 손의 균형과 활동성 지수를 증가시켜 손의 자의적 움직임이 가능하게끔 도와준다⁽⁴⁾. 작업치료 또한 손의 기능 회복에 도움을 줄 수 있다. 작업 치료를 가정에서 임의로 실시할 경우 바텔 지수, EADL 척도, 자동차 변형 지수, 런던 핸디캡 척도가 개선되며 이를 통해 손의 기능이 회복됨을 알 수 있다⁽⁵⁾. 따라서 이번 설계에서는 작업치료 뿐만 아니라 일상생활 속에서도 장비의 도움을 받아 치료를 할 수 있도록 휴대성 및 착용성을 높인 보조 장비의 설계를 목표로 한다.

Table 1. Type of Rehabilitation

	물리치료	작업치료	일상생활치료
진행방법	물리치료사를 동반한 환자의 관절에 대한 물리치료가 진행된다.	작업치료에 사용되는 특정 기구를 이용하여 물리치료사의 감독 아래 환자의 작업치료가 진행된다.	주로 환자의 자택에서 진행되며, 일상생활이라고 할 수 있는 양치, 식사, 옷 입기 등 비교적 간단한 동작들을 위주로 진행된다.
특징	전문적인 치료기관에서 행해져야만 한다.		
대표적인 평가척도	motor assessment scale	Fugl Mayer	바델지수, ADL

2. 설계핵심내용

2.1 설계 문제 정의 및 해결방안

고령자 및 편마비환자의 저하된 손의 기능을 보조하는 장비를 설계하기 위해서는 사용자의 손기능 향상을 위해 필요한 점을 고려해야한다. 고령자 및 편마비 환자의 경우 일반인에 비해 손의 악력이 저하되므로 악력의 보조를 중점으로 하는 장비의 설계가 필요하다. 또한 손의 정확도가 저하되므로 정확한 가이드와 제어를 통해 환자가 실제로 유용하게 사용할 수 있는 장비의 설계가 필요하다. 마지막으로 사용자의 일상생활 속 다양한 환경요소에 대응할 수 있도록 장비의 조절이 가능하도록 설계할 필요성이 있다. 즉, 이번 연구의 목표는 위의 제약사항들을 모두 만족하는 개발된 장비를 통해 환자 혼자서도 일상생활에서 꾸준한 재활치료가 가능하게 해주는 IoT 시스템도 같이 개발하는 것이다.

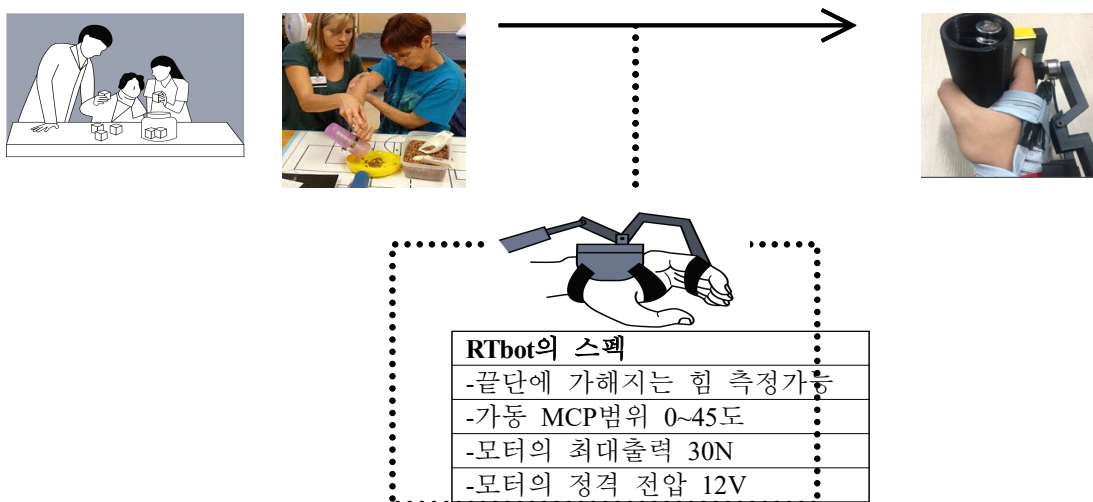


Fig. 3 Purpose of RTbot

2.1.1 사전 기술 조사

손을 보조하는 장비는 다양한 기준에 따라 분류할 수 있다. 그 중에서 장비의 형태에 따라 분류하면 엔드 이펙터, 외골격, 링크구조 및 케이블 기반으로 나눌 수 있다. 또한, 작동방식을 기준으로 본다면 전자 모터, 공압, 유압, 센트럴, 인적자원 기반으로 나눌 수 있다[6]. 현재 시중에 나와 있는 대표적인 손가락 보조 장치들을 분석한 결과는 다음과 같다. EXO 글러브의 경우 DC 모터를 이용한 장력 기반 장비로 일상생활 지원에 사용된다[7]. 사보 글러브는 고무 밴드를 사용하는 수동형 장비이다. 손가락의 외전을 보조하며 사용자의 일상생활에 도움을 준다. 라파엘 장갑의 경우 데이터 수집용 장갑으로 시각

적 피드백을 통해 측정 및 동기 부여를 돕는다[8]. Hiiifive의 경우, 공압력을 가진 소프트 로봇이며, 환자의 손가락 외전 운동을 보조한다[9]. N.S.K가 개발한 외골격 훈련 로봇의 경우, 각 손가락은 리니어 액추에이터에 의해 제어되며 물리치료 및 내, 외전 보조를 목적으로 한다.

Table 2. Rehabilitation Devices Analysis

	Exo-glove	Saebo	Rapael	Hiiifive	Training Glove (N.S.K. Ho)
Actuator	DC Motor	Robber band	X	Air Pressure	Linear Actuator
Direction	Bi-directional	Uni-directional	X	Uni-directional	Bi-directional
Data Acquisition	X	X	O	O	O
Controller	Switch	X	X	Switch	EMG signal
Grip Force Assistance	O	X	X	X	O
Guidance	O	X	X	X	O
MCP ROM [degree]	40	unidentified	unidentified	unidentified	55

2.1.2 차별성 및 회피전략

고령자 및 편마비 환자의 작업치료 및 일상생활 보조를 위해서는 여러 가지 조건이 필요하다. 하지만 시중의 장비들을 이용해 환자의 작업치료 및 일상생활 치료를 돕기에는 부족한 점이 존재한다. 기존제품의 부족한 점을 보완하고 우리 장비만의 차별성을 가지기 위해 기존장비들을 분석하여 불필요한 기능을 최소화 하고 필요한 기능만 포함하기로 결정하였다. 다음 설계지침은 장비의 제작에 있어 중점적으로 고려한 사항들이다.

1. 부족한 손의 근력을 돕기 위한 악력 보조가 필요하다. 고령자 및 편마비 환자의 악력은 정상인보다 낮기 때문에 악력의 보조가 필요하며 이때 줍, 펴 동작 모두 충분한 힘을 제공해야 한다[10].
2. 편마비환자의 동작 안정성을 높이고 뇌 가소성 자극을 위해서는 정확한 줍 동작을 유도해야 한다. 다양하고 정확한 물리적 변화를 손에 가해 말초신경의 결합 및 운동 지도를 통한 손의 기능 회복 및 강화를 유도해야 한다[10].
3. 환자의 상태에 따른 적절한 힘의 제공을 위해 정량적 데이터의 수집 및 분석이 필요하다. 데이터를 바탕으로 적절한 보조를 통해 환자의 운동 자율성을 보장함으로써 환자와의 협업을 기대한다. 또한 데이터 계측을 통해 증거기반 치료의 기반을 구축할 수 있다.
4. 크기와 무게는 환자에게 부담을 주지 않아야 한다. 고령자 및 편마비 환자의 경우 악력뿐만 아니라 전체적인 근육의 활성도가 떨어지므로 장비를 사용함에 있어서 기존의 외골격 제품에 비해 크기와 부피를 줄일 필요성이 있다.
5. 기초적인 일상생활 환경 속에서 장비의 사용을 통해 가볍게 재활치료를 진행할 필요가 있다.

2.1.4 설계 근거 및 이론

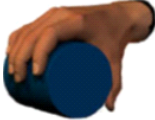
장비 제작 이전에 장비의 필요성 및 기대 효과에 대해 알아보기 위해 재활치료 로봇에 대한 리뷰 논문을 살펴보고 있다. 위 논문에 따르면 현재 재활치료용 로봇들의 경우 보조적인 용도로 활용되고 있으며 환자의 재활치료를 도울 수 있다. 또한 전문가의 도움 및 장비의 추가적인 발전을 통해 로봇만을 이용한 재활치료 또한 가능할 것으로 예측 하고 있다⁽¹¹⁾.

Authors	Robotic device	Number of participants	Stroke stage	Intensity	Concomitant therapy	Summary of results in comparison with conventional therapies
<i>End-effector-type devices</i>						
Werner et al., 2002	Gait trainer	30	Subacute	20 minutes, 5 times per week for 4 weeks	No	No difference
Peurala et al., 2005	Gait trainer	45	Chronic	20 minutes, 5 times per week for 3 weeks	No	No difference
Tong et al., 2006	Gait trainer	54	Subacute	20 minutes, 5 times per week for 4 weeks	Yes	More effective
Dias et al., 2007	Gait trainer	40	Chronic	40 minutes, 5 times per week for 4 weeks	No	No difference
Pohl et al., 2007	Gait trainer	155	Subacute	20 minutes, 5 times per week for 4 weeks	No	More effective
Peurala et al., 2009	Gait trainer	56	Subacute	20 minutes, 5 times per week for 3 weeks	Yes	More effective
Morone et al., 2011	Gait trainer	48	Subacute	20 minutes, 5 times per week for 4 weeks	No	More effective
<i>Exoskeleton devices</i>						
Mayr et al., 2007	Lokomat	16	Subacute	30 minutes, 5 times per week for 4.5 weeks	No	More effective
Husemann et al., 2007	Lokomat	32	Subacute	30 minutes, 5 times per week for 4 weeks	Yes	More effective
Hornby et al., 2008	Lokomat	62	Chronic	30 minutes, 12 sessions total	No	Less effective
Jung et al., 2008	Lokomat	25	Chronic	30 minutes, 3 times per week for 4 weeks	Yes	More effective
Hidler et al., 2009	Lokomat	72	Subacute	1 hour, 12 sessions total	No	Less effective
Westlake & Patten, 2009	Lokomat	16	Chronic	30 minutes, 3 times per week for 4 weeks	Yes	More effective
Schwartz et al., 2010	Lokomat	67	Subacute	30 minutes, 3 times per week for 6 weeks	Yes	More effective
Chang et al., 2012	Lokomat	37	Subacute	40 minutes, 5 times per week for 2 weeks	Yes	No difference

Fig. 4 Robot-assisted therapy for gait function⁽¹¹⁾

또한 일상생활 속에서 사용되는 파지동작을 구분해 보면 다음과 같이 구분할 수 있다. 이때 각 파지동작이 일상생활 속에서 사용되는 빈도수를 비교해보면 강력파지(Power Grip)파생 동작의 사용빈도수가 높다⁽¹²⁾. 따라서 우리는 강력파지동작을 중점적으로 구현하는 설계를 목표로 한다.

Table 3. Grasp Frequency in Daily Household⁽¹²⁾

	Power		Intermediate	Precision
엄지손가락 내전				
	Adducted Thumb	Palmar	Lateral	Writing Tripod
엄지손가락 외전				
	Large Diameter	Power Sphere	Distal Type	Tripod Variation
				
				Parallel Extension

또한 사람의 손은 MCP 각도를 기준으로 각도와 손의 근육으로 발생하는 저항이 서로 선형적이지 않다⁽¹²⁾. 따라서 장비의 설계에 있어서 정확한 데이터를 받기 위해서는 선형화된 식이 아닌 직접적인 데이터의 측정이 필요함을 알 수 있다.

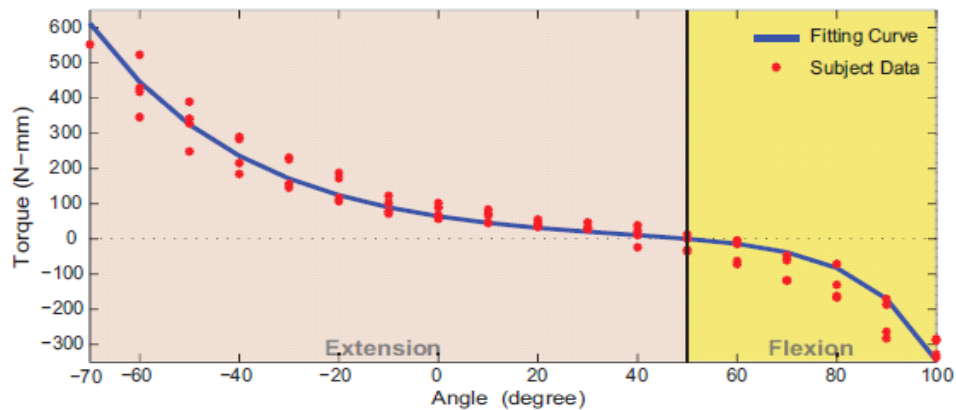


Fig. 5 Angle - Resident Torque Plot at MCP⁽¹²⁾

2.1.2 설계 목표

이번 설계는 기존에 있는 장비를 바탕으로 핵심적인 기능들을 중심으로 장비를 최적화 시킨다. 최적화 대상은 Iot를 활용한 무게 및 부피의 최적화, 작업치료와 일상생활을 구분하는 모드, 적절한 자유도 제한이다. 이를 바탕으로 우리는 ‘고령자 및 편마비 환자를 대상으로 강력파지 동작에 최적화된 외골격 보조장치’ (이하 ‘RTbot’)의 설계를 제안한다. 장비의 제공 모드 및 물리적 설계기준은 표2, 표3을 따른다.

- 일상생활 MODE** 환자 손에 대한 정확한 data의 측정이 필요 없이 힘 조절을 기반으로 한 ON/OFF 방식으로 꺾동작을 보조 해주는 모드이다.
- 작업치료 MODE** 작업치료를 위해 수집된 데이터를 PC에 플로팅 함으로써 환자의 상태 분석이 가능하도록 장비를 추가 연결한 모드이다.

Table 4. Goal Specifications of RTbot

Factor	Index
Maximum End Point Transverse Force	10[N]
Maximum Weight	400[g]
Maximum MCP Angle	40[deg]
Minimum MCP Angle	0[deg]
Motor Voltage	10~13[V]
Used Actuator	1[EA]

2.2 하드웨어 설계

2.2.1 장비의 전체적인 구조

하드웨어의 구조는 크게 작용부(6-1), 연결체(6-2), 동력부(6-3), 고정부(6-4)로 나눌 수 있다. 작용부, 연결체, 동력부, 고정부 및 데이터 측정을 위한 장비들은 서로 핀조인트, 볼트 너트, 및 벨크로로 서로 체결되어있다. 하드웨어의 전체적인 연결방식 및 구조는 fig.6과 같다.

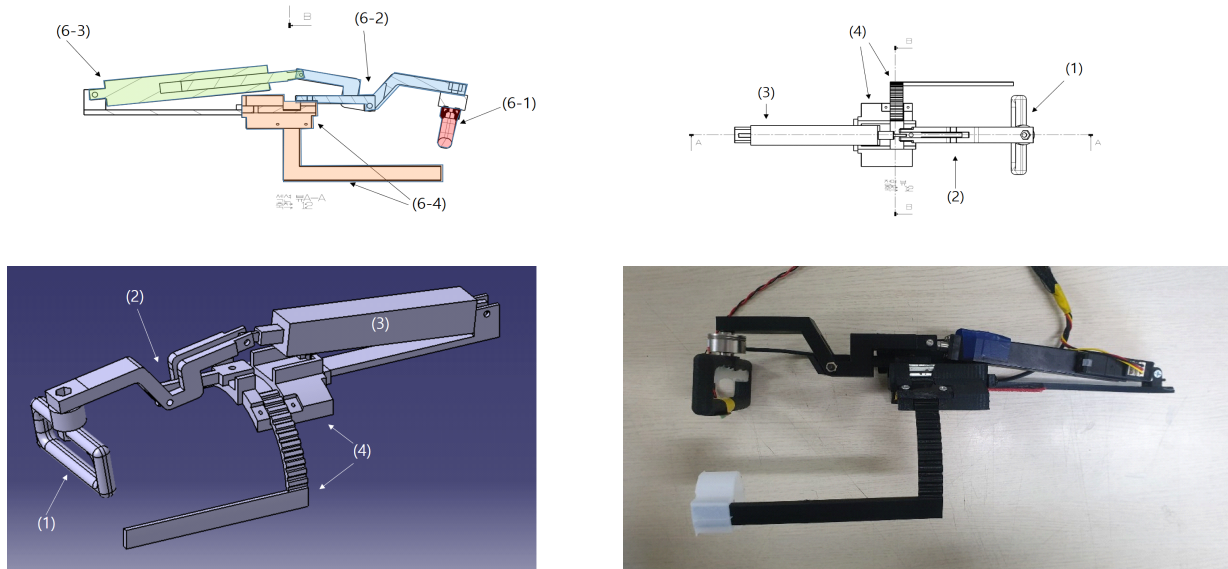


Fig. 6 Assembly of RTbot

2.2.2 작용부의 제약조건, 해결방안, 설계내용 및 응력분석

● 제약조건

- 사용자와 직접 접촉
- PLA 소재의 경우 높은 정도로 사용시 피로감 증가 및 착용성 감소
- 부상의 위험 존재
- 경도가 낮은 소재 사용시 힘의 전달률 저하

● 해결방안

- TPU 소재를 활용해 착용성 증가
- 힘 전달률을 높이기 위해 내부 채움 100%
- 떨어지는 착용성 개선을 위해 접촉부에 실리콘 사용

● 설계내용

작용부는 필렛이 적용된 사각형 형태이며 3D 모델링으로 디자인하였다. 한국인체치수조사 사이트의 통계를 활용하여 일반적인 성인의 손에 적합하도록 너비를 80[mm]로 정하였다⁽¹⁴⁾. 작용부의 착용 위치는 PIP관절이며 데이터 계측을 위한 압력센서 및 로드셀과 직접적으로 연결되어 있다. 추가적으로 사용자의 착용성을 높이기 위해 손등과 닿는 부분에 실리콘을 부착하였다. 설계결과는 fig.7과 같다.

Table 5. Statistics of Adult Hand Width(mm)⁽¹⁴⁾

측정수	평균	최소값	1분위	5분위	25분위	50분위	최대값
39	82.05	4.81	71.4	73.17	78.98	81.19	92.15

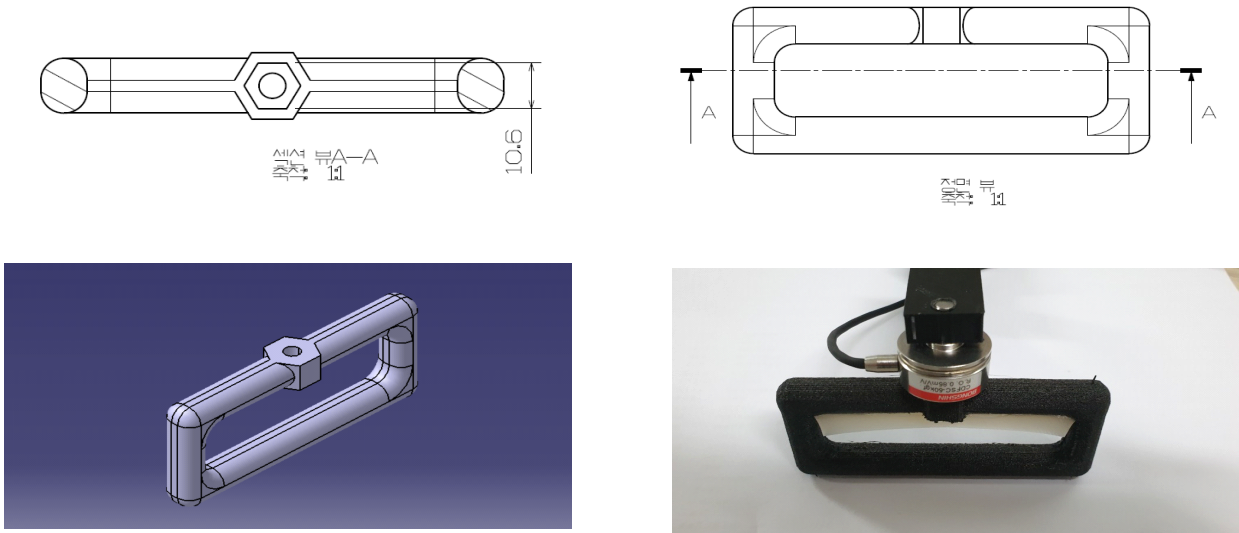


Fig. 7 End-Effector Part of RTbot

● **응력분석**

작동부중 응력에 가장 취약한 부분은 로드셀과 너트로 연결되어 있는 부분이다. 작동부에 가해지는 힘은 다음과 같은 공식으로 구할 수 있다.

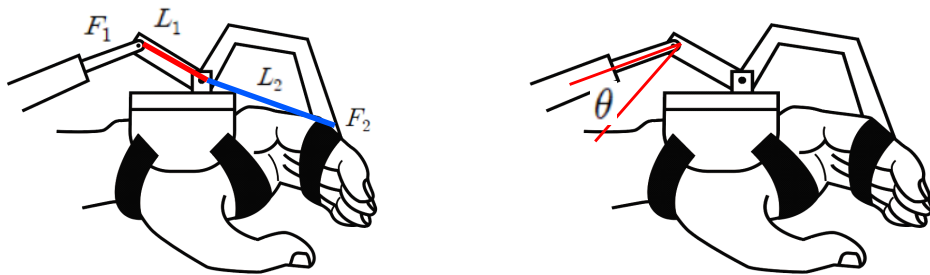


Fig. 8 Maximum Force at End-Effector

$$F_1 \times L_1 = F_2 \times L_2, L_1 = 70[mm], L_2 = 80[mm], 0 \leq \theta \leq 90,$$

$$F_2 = 0.875 F_1 \times \cos(\theta)$$

작동부에 가해지는 최대힘은 각도가 90[degree]일 때 발생한다. 이를 토대로 작동부에 가해지는 최대힘($F_{2,max}$)을 구하면 그 결과는 다음과 같다.

$$F_{1,max} = 30[N], L_1 = 70[mm], L_2 = 80[mm], \theta = 0,$$

$$F_{2,max} = 0.875 F_{1,max} \times \cos(\theta)$$

$$= 0.875 \times 30 \times \cos(0) [N]$$

$$= 26.285 [N]$$

육각 너트의 길이는 약 10[mm]이다. 이때 단면적의 넓이를 구하면 다음과 같다.

$$L_{vt} = 10mm, A_{vt} = 6 \times \frac{1}{8} \times L_{vt}^2 \times \frac{2}{\sqrt[2]{3}},$$

$$L_{vt} = 10mm, A_{vt} = L_{vt}^2 \times \frac{\sqrt[2]{3}}{2},$$

$$A_{vt} = 97.3 [mm^2]$$

이를 바탕으로 인장응력을 계산, 소재의 최대인장응력과 비교하면 다음과 같다.

$$A_{vt} = 97.3 [mm^2],$$

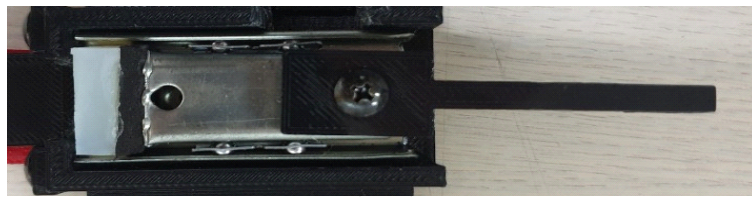
$$\sigma_{vt} = \frac{F_2}{A_{vt}}, F_{2, \max} = 26.285 [N], K_t (\text{응력 집중계수}) = 3, S (\text{안전률}) = 3, \sigma_{TPU} = 29 [MPa]$$

$$\sigma_{vt} \times S \times K_t = 2.43 [MPa] < \sigma_{TPU} = 29 [MPa], \text{안전하다},$$

결과적으로 작용부는 파괴로부터 안전한 것을 알 수 있다.

2.2.3 연결체의 제약조건, 해결방안, 설계내용 및 응력분석

- 제약조건
 - 장비의 회전축과 손가락의 회전축(MCP)의 위치상이
 - 인장 길이 기준 설계 시 연결 본체의 회전축과 작용부의 길이 상이
 - 인장 길이 기준 설계 시 작용부 위치 움직임 및 운동에너지 손실을 증가
 - 최소 인장 시 미세 오차로 인한 동력부 부담 및 레일 끝단의 마모 위험성이 존재한다.
- 해결방안
 - 최대 인장 시 수직 길이 차이만큼 기계의 회전축을 수평 이동
 - 연결체의 회전축을 키와 핀 조인트로 체결한 후 키를 약 4[cm] 길이의 레일 위에 부착
 - 레일의 길이는 여러 번의 실험을 통해 최적화된 길이를 선정
 - 볼 베어링을 통해 움직이는 레일은 약 30[mm]정도의 행정거리를 가짐으로써 회전축 차이 극복
 - 레일 마모, 동력부 과부하 방지를 위해 레일 끝단에 실리콘과 스펀지로 이루어진 완충재를 추가



(9-1)



(9-2)

Fig. 9 Rail and Cushioning Material at Fixture Part of RTbot

- 설계내용

연결체는 크게 연결본체(10-1), 키(10-2), 레일(10-3)로 구성되어 있다. 연결본체는 PLA를 소재로 3D 모델링을 통해 제작되었다. 리니어 액추에이터에서 생성된 병진운동에너지를 회전에너지로 전환시켜주

는 역할을 한다. 리니어 액추에이터, 키 와는 핀조인트로 체결되었으며, 작용부와는 로드셀 및 너트를 이용해 연결되어있다. 평시 상태에서는 레일이 완충재에 접한상태로 존재한다(11-1). 리니어 액추에이터가 인장시 우선 레일이 인장되며 MCP 와 연결본체의 회전축 사이의 길이차를 극복한다(11-2). 이후 리니어 액추에이터의 병진운동 에너지는 연결본체를 통해 회전운동 에너지로 전환되어 작용부에 전달한다(11-3). 이를 CATIA 화면에서 표현하면 fig.11과 같다

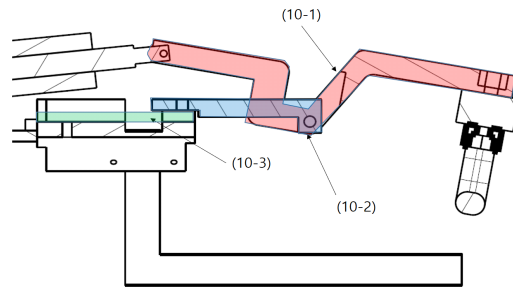


Fig. 10 Linkage Part of RTbot



Fig. 11 Operation Process of Linkage Rail

● 응력분석

연결 본체 중 응력에 취약한 두 부분 선정 후 응력계산 하였다.응력 취약지점은 동력부와 연결된 핀 조인트, 키와 연결된 핀 조인트 두 부분이다. 각각의 지점에 작용되는 최대 힘($F_{1,max}$, $F_{2,max}$)을 계산 하면 그 결과는 다음과 같다.

$$F_{1,\max} = 30[N], F_{\text{키 조인트}} = F_{1,\max} \times \frac{150}{80} = 56.25 [N]$$

연결 본체 핀 조인트들의 수평투영넓이는 다음과 같다.

$$A_{\text{동력부 조인트}} = 31.5[mm^2], A_{\text{키 조인트}} = 65[mm^2],$$

이를 바탕으로 전단응력을 계산, 소재의 최대전단응력과 비교하면 다음과 같다.

$$\sigma_{\text{동력부 조인트}} = \frac{F_{1,\max}}{A_{\text{동력부 조인트}}}, \sigma_{\text{키 조인트}} = \frac{F_{\text{키 조인트}}}{A_{\text{키 조인트}}}, K_t(\text{응력 집중 계수}) = 3, S(\text{안전률}) = 3, \sigma_{PLA} = 35.7 [MPa]$$

$$\sigma_{\text{동력부 조인트}} = \frac{30}{31.5} \times 3 \times 3 = 8.571 [Mpa], \sigma_{\text{키 조인트}} = \frac{56.25}{65} \times 3 \times 3 = 7.788 [Mpa] < \sigma_{PLA} = 35.7 [Mpa]$$

결과적으로 연결본체는 파괴로부터 안전한 것을 알 수 있다.

2.2.4 동력부 제약조건 및 해결방안

● 제약조건

- 적절한 힘 지원 및 방향 가이드를 위해서는 MCP 관절을 기준으로 회전 운동하는 모터필요
- DC혹은 서보모터를 MCP에 설치하게 될 경우 모터의 무게 및 부피가 방해요소로 작용
- 작은 모터를 선정하게 될 경우 충분한 악력을 제공 불가

● 해결방안

웜 동작에 방해가 되지 않으며 자체 하중으로 인한 부담이 최소화 되도록 손과 팔의 중심선에 장비가 위치하도록 외골격 기반의 리니어 액추에이터를 동력원으로 선정하였다. 리니어 액추에이터는 모터를 이용해 일정한 거리 및 힘을 제공하는 병진 운동 장치로써 리니어 액추에이터는 위치나 힘 기반 제어를 하게 된다. 실험을 통해 얻은 각도-스트로크 변환방정식을 이용해 위치 제어가 가능할 경우 할 경우 결과적으로 MCP 각도기반제어를 할 수 있다. 이는 리니어 액추에이터를 통해 MCP 위치에 모터를 부착하는 방식과 유사한 효과를 얻을 수 있다. MCP의 각도 범위는 약 80degree이며 이를 충분히 포함하기 위해 행정거리 98mm, 최대인장력 30N의 L12-30PT-10 리니어 액추에이터를 사용하였다.



Fig. 12 Linear Actuator of RTbot

2.2.5 고정부의 제약조건, 해결방안 및 설계내용

● 제약조건

- 작용부에서 발생하는 손과 물체의 반력의 적절한 분배, 해소 필요
- 힘 전달의 효율성과 장비의 착용성의 트레이드 오프(trade-off) 관계
- 엄지 고정 시 엄지의 MCP는 2 DoF 관절로써 적절한 자유도 제한 장치의 필요성

- 해결방안

- 착용 성 증가 및 반력해소를 위해 착용성이 높은 팔목보호대에 경도가 높은 고정부를 벨크로를 이용해 부착하는 형태 사용
- 일반적으로 강력 파지 동작 수행시 위치하는 엄지에 대응하는 125mm 지름의 원의 형태로 엄지를 고정할 수 있도록 설계

- 설계내용

고정부는 키를 포함한 레일을 팔과 밀착시키며 레일이 팔과 평행하도록 유도한다. 착용의 편의성을 위해 손에 팔목보호대를 착용한 이후 3D 모델링으로 구성된 고정부와 벨크로로 연결한다. 또한 엄지의 제어가 힘든 사용자를 위해 엄지 고정부를 길이조절이 가능하며 탈부착이 가능하도록 설계하였다. 엄지의 MCP는 2 DoF 관절을 간단한 구조로 제어하기 위해 지름 125[mm]의 원을 따라 움직이도록 하는 고정 장치를 고안하였다. 장치의 고정은 커버와 나사를 통해 할 수 있으며 길이의 조절이 가능하다.

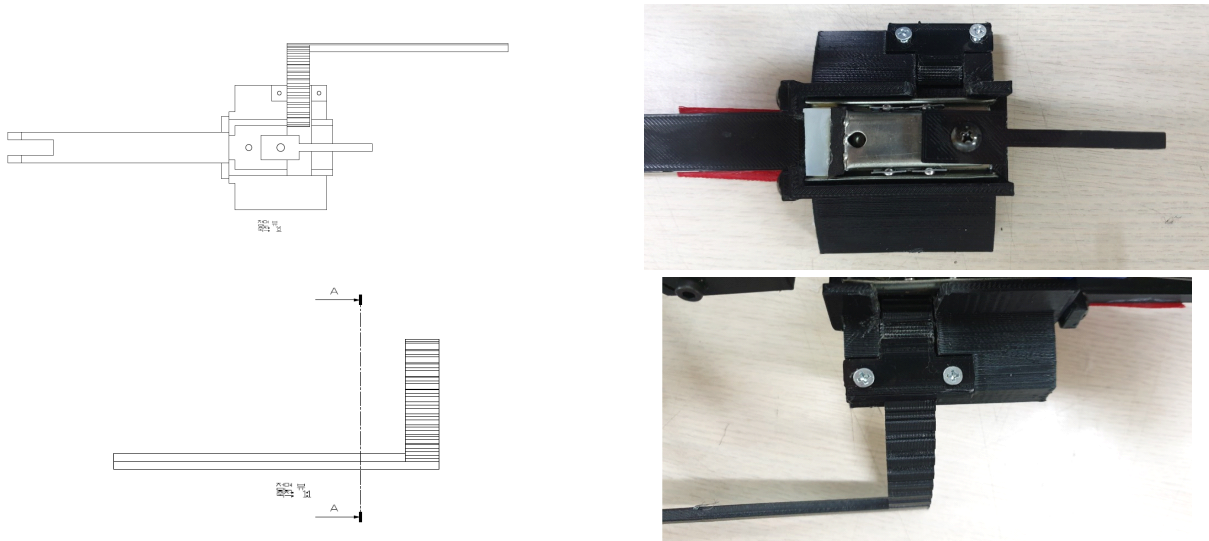


Fig. 13 Fixture Part of RTbot

2.3 소프트웨어 설계

2.3.1 데이터 수집 장비

데이터 수집부는 로드셀, 압력센서, DAQ로 이루어져있다. 로드셀은 손에 직접적으로 가해지는 힘을 측정하기 위해 작동부와 연결체 사이에 위치해 있으며, 이를 통해 연결체에서 오는 PIP 위치의 연직방향 힘을 정확하게 측정할 수 있다. 물체와의 접촉 여부를 알기 위해 작용부하단에 압력센서가 위치해있다. 이를 통해 물체와의 접촉여부를 판단하고 MCU에서 리니어 액추에이터의 동작여부를 판단한다. DAQ는 로드셀을 통해 들어온 힘을 측정하여 PC에 모니터링한다.

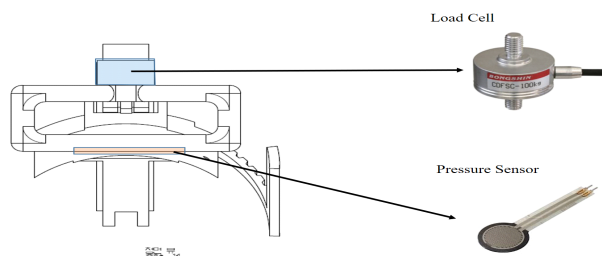


Fig. 14 Data Acquisition Sensors

2.3.3 제어 알고리즘

시스템 구동 알고리즘은 fig.15와 같다. 앱인벤터로 개발한 휴대폰 어플리케이션을 이용해 IoT 시스템을 개발한다. 휴대폰에서 블루투스통신을 이용해 아두이노에 명령어를 전송하면 그에 따라 리니어 액추에이터를 동작시킨다. 물체를 쥐는 알고리즘의 경우 물체 접촉 이전까지 위치 기반 제어, 접촉 이후 힘 기반제어를 실행한다. 이를 통해 물체의 정확한 각도제어 및, 파지력 제어를 할 수 있다.

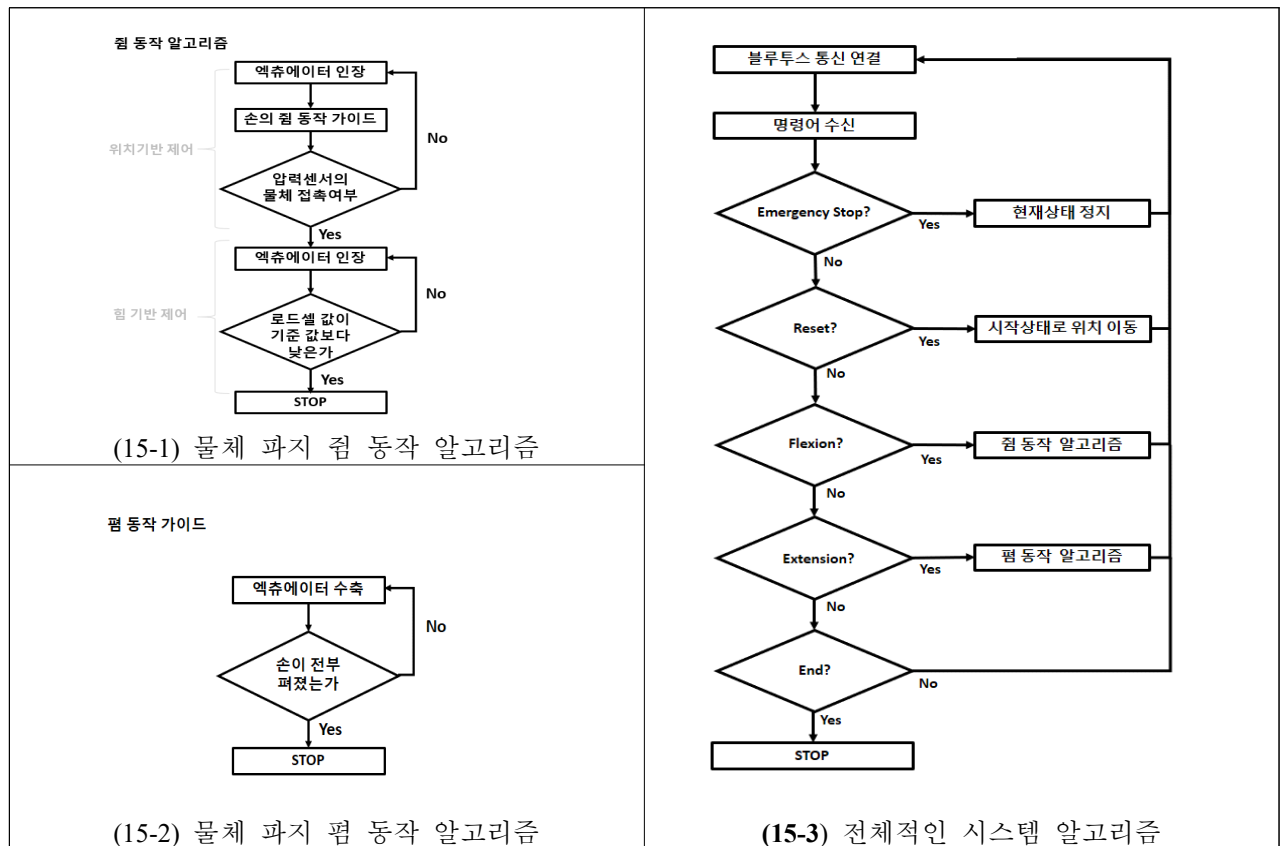


Fig. 15 Overall Control Algorithms of RTbot

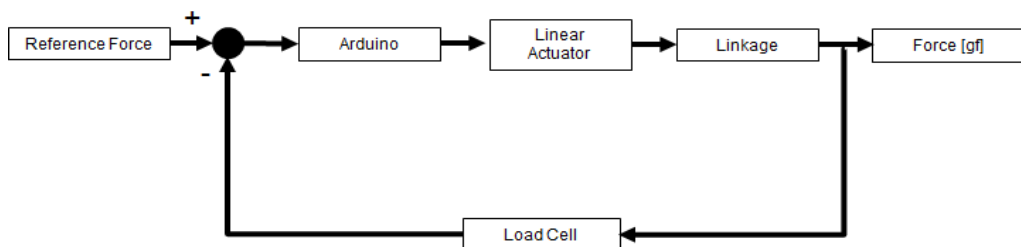
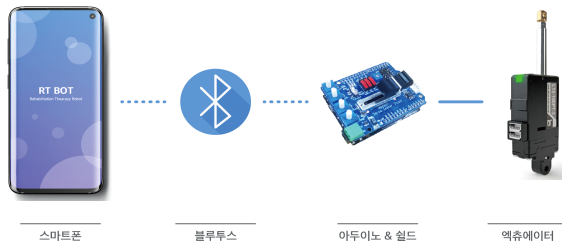


Fig. 16 Force Control Algorithm of RTbot

2.3.4 IoT 디자인

장비의 제어는 어플리케이션을 통해 이루어진다. 어플리케이션은 앱인벤터를 통해 제작되었으며 HC-06과 블루투스 통신을 하여 아두이노에 명령어를 보내고 물체의 접촉여부를 텍스트 형태로 전달받아 화면에 표시한다. 어플리케이션에서는 쥐기, 펴기, 긴급정지, 그만두기 악력의 세기를 제어할 수 있으며 물체 접촉 여부를 표시할 수 있다.



(16-1) 구축된 IoT 시스템의 개략도



(16-2) 앱 인벤터로 제작된 어플 프로토타입

Fig. 16 IoT System of RTbot

3. 결과 및 토의

3.1 장비의 작동방식

장비의 제어는 스마트폰의 어플리케이션을 통해 이뤄진다. 스마트폰에는 크게 네가지 종류의 버튼이 존재하며 각 버튼은 다음과 같은 기능을 한다.

● 쥐기 버튼

어플에서 '쥐기' 버튼을 누르면 위의 '쥐는 동작'과 같은 과정을 통해서 장비가 작동한다. '쥐는 동작' 과정은 먼저 리니어 액추에이터가 인장되면, 레일이 전방으로 움직이고, 연결부의 시계 반대방향 회전으로 인해 MCP의 각도가 변화되는 과정으로 이루어져 있다. 본 과정은 '물체파지 알고리즘'의 '위치기반 제어'의 과정을 나타낸 것이다. '물체파지 알고리즘'의 '힘 기반 제어'의 과정은 위치기반 제어에서 리니어 액추에이터가 인장할 때 증가하던 MCP의 각도가 더이상 증가하지 않고, 물체를 쥐는 파지력이 증가하는 과정이다. 따라서 힘 기반 제어의 과정은 외적인 변화를 보여주지는 않지만, 로드셀에서 출력되는 값의 증가를 살펴볼 수 있다.

● 펴기 버튼

어플에서 '펴기' 버튼을 누르면 '펴는 동작'과 같은 과정을 통해서 장비가 작동한다. '펴는 동작' 과정은 먼저 리니어 액추에이터의 수축을 통해 연결부의 시계방향 회전으로 인해 MCP의 각도가 변화가 되면, 레일이 후방으로 움직이고, 마지막에 리니어 액추에이터의 완전수축으로 마무리 된다. 펴는 과정은 쥐는 과정과 같이 위치기반 제어, 힘 기반 제어 2가지의 영역으로 나뉘지 않고 전 과정 전부 위치기반의 제어로 작동한다. '펴는 동작'과 같은 과정은 어플에서 '펴기' 버튼 뿐만 아니라 '초기화'와 '긴급정지' 같은 버튼이 눌러져도 같은 매커니즘으로 작동한다.

● 긴급정지 버튼

'긴급정지'버튼의 경우 사용자의 안전을 위해서 설계된 버튼이다. 본 장비를 이용하여 재활치료 도중 어떠한 일로 인하여 문제가 발생한 경우 긴급정지 버튼을 눌러서 해당 위치에서 모든 프로세스가 정지되게 된다.

● 초기화 버튼

'초기화' 버튼의 경우 모든 과정을 멈추고 초기상태로 돌아와 처음부터 다시 시작하고 싶을 때 사용되

는 버튼이다. 버튼이 눌린 경우 펴기 버튼이 눌렸을 때와 같은 매커니즘으로 작동한다.

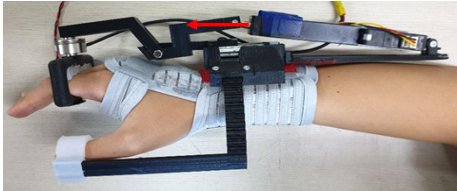
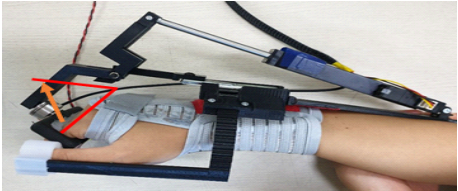
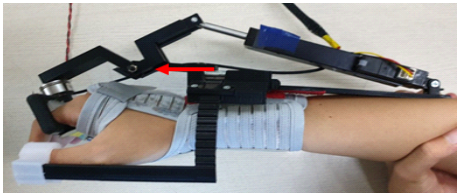
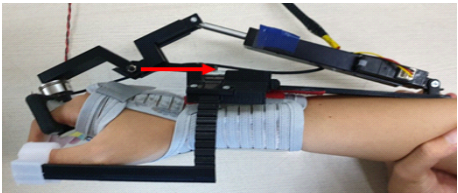
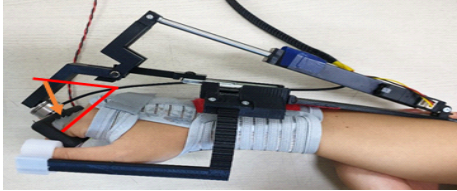
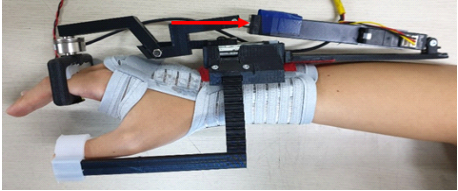
과정 순서	쥐는 동작	과정 순서	펴는 동작
1번		1번	
2번		2번	
3번		3번	

Fig. 17 Operating Process of RTbot

3.2 RTbot의 성능평가

3.2.1 RT bot 최대 힘 평가

RTbot의 성능평가는 두가지 방식으로 이루어진다. 첫 번째는 장비의 최대 힘과 각도를 측정하기 위한 실험이다. 우선 최대힘의 경우 손에 힘을 주지 않은 상태에서 최대 내,외전을 반복하여 그때 손의 반력을 극복하는 실험을 진행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

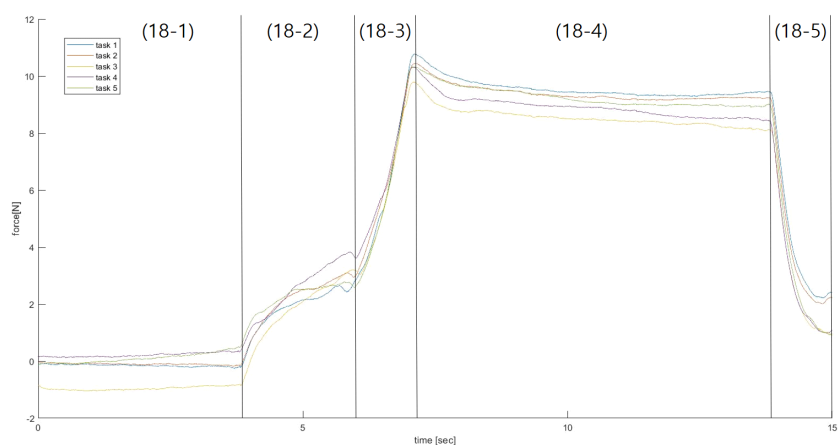


Fig. 18 Time - Force plot of no-load hand with RTbot

무부하 상태의 손에 힘을 가했을 때 손은 그 구조상 반력이 발생한다. 손의 각도에 따라 5단계로 나눌 수 있는데, 우선 처음에는 평시상태를 유지한다(18-1). 이후 MCP의 중립적 위치 이전까지 선형적 관계를 가지며 힘은 점차 증가한다(18-2). 이후 손의 중립적 위치를 지나게 될 경우 반력이 상승하며 기울

기가 달라진다(18-3). 손이 내전된 상태를 유지(18-4), 마지막으로 원래 상태로 되돌아 오게된다(18-5). 위 그래프를 통해 RTbot이 목표치인 10[N] 이상의 힘을 제공할 수 있는 것을 확인하였다.

3.2.2 RT bot ROM 평가

장비가 제공할 수 있는 ROM을 알아보기 위해 손에 힘을 주지않은 상태에서 장비를 통해 움직이는 최대 외전, 최소 내전시 사진을 통해 최대 ROM을 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

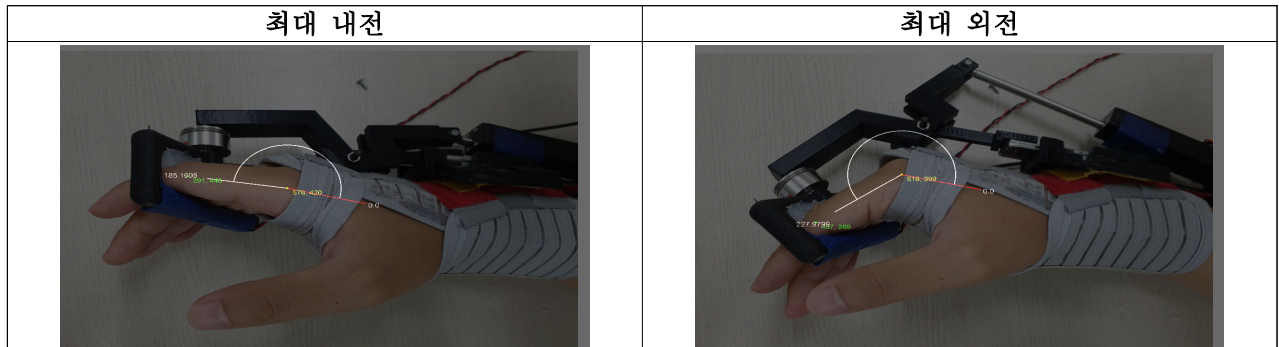


Fig. 19 Maximum ROM of RTbot

위와 같이 최대 내전 5.1[degree], 최대 외전 47.97[degree]로써 약 42.9[degree]의 ROM을 가짐으로써 목표치인 40[degree]를 상회하는 ROM을 가짐을 알 수 있다.

3.2.3 RT bot 악력 세기 조절 평가

물체를 실제로 쥌 수 있는지를 알아보기 위해 손에 힘을 주지 않은 상태에서 RTbot의 보조 악력의 크기를 변화하며 물체를 쥐어보는 실험을 진행하였으며 결과는 fig. 20와 같다.

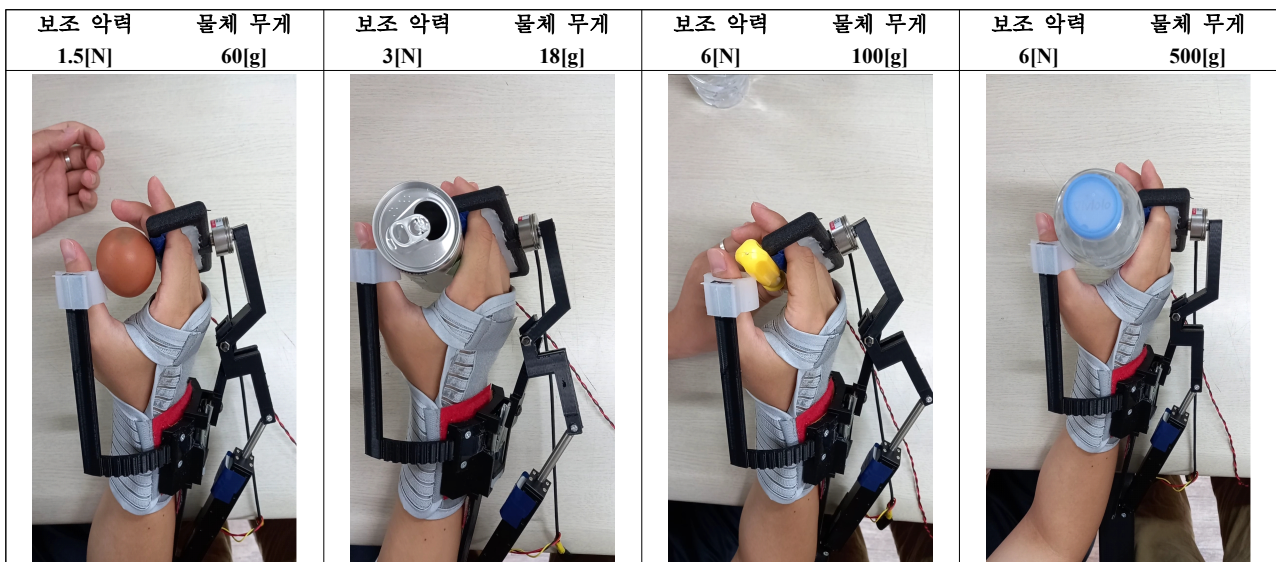


Fig. 20 Various objects grasping with RTbot

물체의 파손위험이 있는 계란과 빈 캔은 각각 1.5[N], 3[N]의 악력을 보조 함으로써 물체의 파지 및 이동이 가능하였다. 또한 지름이 작은 물체 및 무게가 무거운 물체를 쥌 경우 6[N]이상의 악력을 보조해

줌으로써 물체의 파지 및 이동이 가능해졌다.

3.3 RTbot의 활용방안 및 기대효과

● 연구분야에서의 활용

- 재활치료 분야에서 본 장비를 사용하여 손의 기능회복에 대한 연구에 사용될 수 있다.
- 본 장비는 뇌가소성 원리를 활용하는 장비이므로 쥘 동작의 회복 매커니즘 분석에 사용될 수 있다.

● 복지적 측면에서의 활용

- 본 장비의 비교적 가벼운 무게와 휴대성으로 인해 일상생활 지원을 위한 웨어러블 형태의 장비로 사용될 수 있다.
- 실제 재활현장에서 손기능 회복에 대한 데이터 베이스 구축으로 증거기반 치료의 토대를 마련할 수 있다.

● 장비설계를 통해 얻을 수 있는 기대효과

- 기존 장비에 비해 상대적으로 낮은 가격대의 형성으로 가격 경쟁을 통한 유사 제품군의 가격인하를 불러올 수 있다.
- 지속적인 R&D의 토대를 마련할 수 있다.

3.4 장단점 및 의의

3.4.1 RT bot의 필요성 및 차별성

RTbot의 저렴한 제작단가, IoT를 활용한 쉬운 제어방식, 정량적 데이터 계측의 활용성은 기존의 장비에서는 볼 수 없는 RTbot만의 특징이다. 또한 장비와 관련 후속 연구 및 국내 손가락 재활치료 및 보조장비의 선도 제품으로써 다양한 분야에서 활용이 가능하며 다른 제품으로 대체할 수 없는 제품으로 볼 수 있다.

3.4.2 RT bot의 IoT 시스템

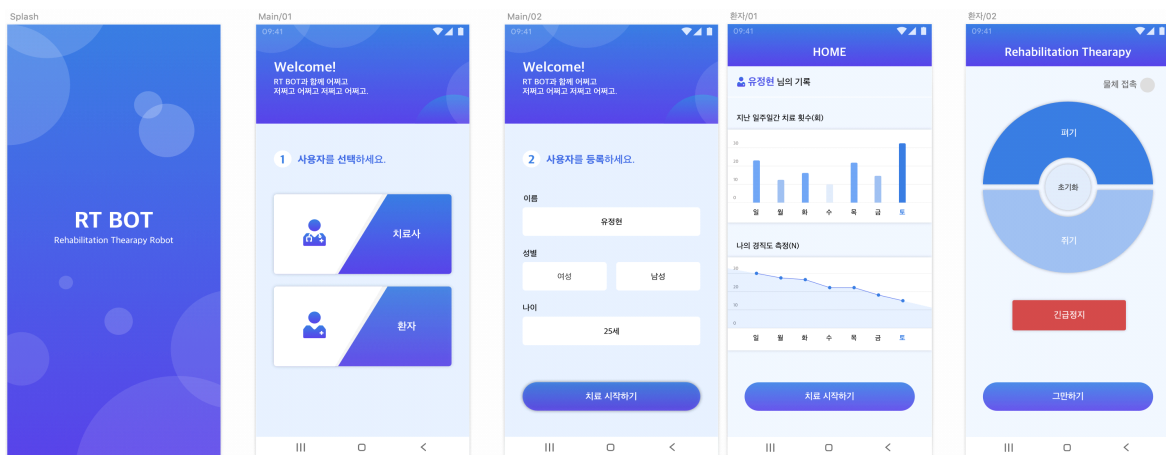


Fig. 21 Sample Images of RTbot Application

IoT 시스템의 구축과 UX/UI의 지속적인 개발을 통해 유사 제품군에 비해서 좀더 사용자 친화적인 환경을 구축하였다. 또한 작용부 부분에 부착된 센서를 통해서 사용자 손에 대한 실시간 데이터를 받는 것을 통해서 실시간으로 어플 화면에 시각적인 피드백을 줄 수 있다는 점과 증거기반 치료의 기틀을 만

든다는 점에서 다른 제품들과 큰 차별성을 보여준다.

3.4.3 제작단가 및 시장성 분석

RTbot의 판매전략은 초기, 중기, 후기 세 부분으로 구분할 수 있다.

Table 6. RTbot Sales Strategy

Phase 1	Phase 2	Phase 3
시스템 안정화	점유율 확대	선도시장 진입
● 특허 출원 ● 의료기기 인증 취득 ● 초기 시장 · 고객 요구사항 반영 및 보완 ● 대량 생산 체계 구축 준비 ● 초기판매	● 대형 병원 계약을 통한 공급망 확대 ● 중소기업박람회 참가 등을 통한 제품 노출 기회 증가 ● SAEBO 등 유통망을 보유한 시장 선도업체의 ODM방식 물품 공급	● 점유율 확대과정을 통해 안정적 매출 확보 ● 지속적인 제품 R&D로 사업 포트폴리오 확장

Table 7. Cost of Sales

구분	내역	개수	단가(원)	금액(원)	비고
원재료	손등부 모듈	1	38,500	38,500	PLA 활용 자체제작 (원재료 계산)
	기구부 모듈	1			
	모터 받침대	1			
	모터 브래킷	1			
	M5 나사	10	20	200	
	2단레일	1	1,300	1,300	
	실리콘	1	32,030	32,030	
	리니어 모터(L12-30PT-10)	1	225,500	225,500	
	마이크로 컨트롤러(IR-MB03)	1	14,300	14,300	
	서보 테스터 쉴드	1	88,000	88,000	
노무비		원재료의 20%		39,980	
간접비		원재료의 10%		79,970	
계				519,780	

4. 결 론

이번 설계의 목표는 ‘고령자 및 편마비 환자를 대상으로 강력파지 동작에 최적화된 양방향 외골격 보조장치’이다. 이번 설계가 기존의 장비들과의 차별성은 크게 다섯가지로 정리할 수 있다.

1. 기존의 장비에서 실제 파지 동작시 많이 사용되는 기능만 구현하여 제작 단가, 부피 및 무게를 감소 시켰다. 제작단가는 약 500,000(원) 으로서 손의 기능회복을 돕고 데이터를 계측하는 경쟁사 ‘Lapael Smart Glove’의 15,000(\$)에 비해 가격 경쟁력이 있는 것으로 판단된다.

2. RTbot은 제한된 기능속 다양한 동작 수행을 위한 기능이 존재한다. 엄지의 위치를 조절함으로써 다양한 물체의 모양에 대응할 수 있다. 또한 힘의 세기를 조절함으로써 일상생활 속에서 다양한 경도의 물체에 대응, 파지동작을 수행할 수 있다.

3. 장비의 동작에 있어서 리니어 액추에이터를 활용하여 내전뿐 만아니라 외전 시에도 악력의 보조, 가이드를 할 수 있다. 이를 통해 손의 기능이 떨어진 고령자 및 편마비 환자들을 다양한 형태로 보조할

수 있다.

4. 정확한 힘 데이터 측정을 통해 재활치료 시 정량화된 데이터로 환자의 상태 분석 및 피드백이 가능하다. RTbot의 경우 PIP부분에 작용하는 힘을 직접적으로 측정함으로써 일반적으로 사용되는 TROM 방식의 손의 데이터 측정을 적용할 수 있으며 이를 통해 치료사의 의사결정을 보조할 수 있다.

5. 블루투스 통신을 이용한 IoT 시스템의 적용으로 사용자의 편의성이 증가하였다. 또한 이후 장비의 지속적인 R&D 과정에 있어 블루투스 통신 명령어 추가를 활용한다면 다양한 데이터의 활용 및 기능 확장성이 증가하였다.

위의 차별성을 바탕으로 직접적인 손 데이터의 계측을 통해 새로운 연구분야의 개척, 장비의 작은 제작단가를 통한 복지, 경제적인 측면에서 다양하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

후기 1. 보고서 작성과 설계 디자인에 많은 도움을 주신 김재효 교수님과 휴먼로보틱스 랩실 구성원 분들에게 진심으로 감사드립니다.

후기 2. 3D 프린터 사용과 필수재료 구매에 지원금을 지원해주신 한동대학교 기계제어 학부에 감사드립니다.

후기 3. 학생에게는 고가의 센서와 전자재료를 사용하는데 필요한 비용을 지원해주신 한동대학교 STAR 사업단 관계자 분들에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, J, Lee, E.J, 1985, Statistics Korea "World and Korea Population Prospects: the 2019 Revision" pp. 11~15
- (2) Health insurance review and assessment service, National Health Insurance Service "Annual Report: Statistics of Health Insurance" pp. 25
- (3) Kim, E.T al., Executive Summary of Stroke Statistics in Korea 2018: A Report from the Epidemiology Research Council of the Korean Stroke Society 2019
- (4) Geiger, R. A., Allen, J. B., O'Keefe, J., & Hicks, R. R. (2001). Balance and mobility following stroke: effects of physical therapy interventions with and without biofeedback/forceplate training. *Physical therapy*, 81(4), 995-1005.
- (5) The Indian Journal of Occupational Therapy. (n.d.). Retrieved June 25, 2020, from <http://www.ijotonweb.org/>
- (6) Yue, Zhang, & Wang, Hand Rehabilitation Robotics on Poststroke Motor Recovery 2017
- (7) H. In, B. B. Kang, M. Sin and K. Cho, "Exo-Glove: A Wearable Robot for the Hand with a Soft Tendon Routing System," in *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 22, no. 1, pp. 97-105, March 2015, doi: 10.1109/MRA.2014.2362863.
- (8) Hee-Tae Jung, Hwan Kim, Jugyeong Jeong, Bomin Jeon, Taekeong Ryu, & Yangsoo Kim (2017). Feasibility of using the RAPAE Smart Glove in upper limb physical therapy for patients after stroke: A randomized controlled trial. *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference*, 2017, 3856-3859. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2017.8037698>

- (9) Ju-Seon Yoon, Young-Chan Kim, Mi-Ju Kim, Jae-Hyo Kim. (2018). An Air Pocket Glove for Finger Rehabilitation and Quantitative Assessment of Hemiplegic Patients. 한국정밀공학회지, 35(8), 817-823.
- (10) Park & Park, Grip strength in post-stroke hemiplegia 2016
- (11) Won Hyuk Changa, Yun-Hee Kim(2013), Robot-assisted Therapy in Stroke Rehabilitation, J Stroke. 2013 Sep; 15(3): 174–181, doi: 10.5853/jos.2013.15.3.174
- (12) T. Feix, J. Romero, H. Schmiedmayer, A. M. Dollar and D. Kragic, "The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types," in IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 46, no. 1, pp. 66-77, Feb. 2016, doi: 10.1109/THMS.2015.2470657.
- (13) Kuo, Pei-Hsin & Deshpande, Ashish. (2010). Contribution of passive properties of muscle-tendon units to the metacarpophalangeal joint torque of the index finger. 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2010. 288 - 294. 10.1109/BIOROB.2010.5626918.
- (14) Size Korea, “5th anthropometric measurement in Korea”, 2004, from <https://sizekorea.kr/measurement-data/hand>