



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

전기 유압 시스템을 적용한
차세대 운동기구 개발

Developing Next-Generation Workout Machine with
Electro-Hydraulic System

울 산 대 학 교 대 학 원
기 계 공 학 과
안 지 환

전기 유압 시스템을 적용한
차세대 운동기구 개발


지도교수 이 윤 호


이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함


2023년 12월

울 산 대 학 교 대 학 원
기 계 공 학 과
안 지 환

안 지 환의 공학석사학위 논문을 인준함

심 사 위 원 이 장 명 

심 사 위 원 이 병 룡 

심 사 위 원 이 윤 호 

울 산 대 학 교 일 반 대 학 원

2024년 2월

감사의 글

울산대에서 보낸 8년 동안 학업과 함께 사업을 병행하며 풍부한 경험을 쌓을 수 있었습니다. 이 소중한 시간 동안 도움을 주신 교수님들께 진심으로 감사의 인사를 전합니다. 직접 이든 간접이든 제게 좋은 기회를 제공해주셔서 감사합니다.

뿐만 아니라, 창업진흥원, 중소기업벤처부, 신용보증기금, 그리고 유니스트 창업 지원팀에 제도 부족한 자금을 지원해주셔서 연구를 진행할 수 있었습니다. 이 모든 협조에 감사드립니다. 또한, 논문 심사에 기여하신 이장명 교수님, 이병룡 교수님, 이운호 교수님께도 깊은 존경의 마음을 표합니다. 여러 번의 공모전과 정부지원과제를 통해 진행된 '전기 유압 운동 기구' 관련 연구는 산학연 관계자 분들의 지원과 참여 덕분에 이뤄진 것이며, 이 모든 분들께 고개 숙여 감사의 말씀을 전합니다. 이 과제의 책임 대표자로서 정말 감사합니다.



- 2023년 청년CEO육성사업 선정
- 2022년 창업성장기술과제(디딤돌) 선정
- 2022년 예비창업패키지 선정
- 2022년 과학기술정보통신부 부처 실험실연계 창업경진대회 133팀 최우수상 수상
- 2022년 부울경 액셀레이팅 프로그램 ‘부스타락셀’ 우수상 수상
- 2021년 동남권실험실 창업혁신단 주관 창업 아이템 경진대회 대상 수상
- 2021년 울산과기원 주관 U-챌린지 페스티벌 과학기술정보통신부장관 대상 수상
- 2021년 과학기술정보통신부 부처 한국연구재단 주관 실험실연계 창업 I-Corps 사업 동남권 해외탐색팀 선정
- 2021년 SAN JOSE University 주관 ‘Silicon Valley Innovation& Startup’ 대상 수상
- 2020년 서울특별시 주관 ’ 전국민창업오디션 TRY EVERYTHING’ 최우수상 수상
- 2020년 교육부, 한국연구재단 ‘2020 산학협력 EXPO’ , 한국공학한림원 수여 최우수

프로그램 명 (시행 부처/기관)	과제 명	소속기관	개발기간 (시작-종료)
BTS 실전문제 연구팀 (울산과학기술원, 울산대 공동 주관)	로잉 머신 가상 무게 연동 메타 버스 맵 개발	울산과학기술원 & 울산대학교	'22.05 ~ '22.12
BTS 실전문제 연구팀 (울산과학기술원, 울산대 공동 주관)	비대면 스마트미러를 이용한 AI 트레이너 개발	울산과학기술원 & 울산대학교	'21.05 ~ '21.12
생애 최초 청년창업 지원사업 (창업진흥원)	전기 유압 액추에이터를 이용한 차세대 가상무게 운동 기구	울산창조경제혁신센터	'21.09.01 ~'21.11.30
공공기술 기반 시장연계 창업 탐색 지원사업 (과학기술정보통신부)	전기-유압 액추에이터를 이용한 차세대 버츄얼 웨이트 머신	울산과학기술원	'21.09.01 ~'22.01.31
경남/울산지역혁신플랫폼 스마트제조ICT 사업(한국연구재단/**대학교)	AI/Big Data 기반 가상무게 운동 기구 개발	울산대학교	'21.12.01 ~'22.03.31
대학기술경영촉진(TMC) 사업 (울산대학교 산학협력단)	가상 무게(전기 유압 액추에이터)를 적용한 차세대 스마트 운동	울산대학교 산학협력단	'21. 8.1 ~ '21. 10.31

국 문 요 약

전기 유압 시스템을 적용한 차세대 운동 기구 개발

Developing Next-Generation Workout machine with Electro-Hydraulic System

울산대학교 일반대학원

기계공학과

안 지 환

이 논문은 코로나 팬데믹 이후 건강에 대한 관심이 높아지면서 기존 전통적인 무게판을 사용하는 기구에서 발생하는 안전 문제와 편의성 문제를 극복하기 위해 다양한 방식의 근력 운동 기구와 작동 알고리즘을 다루고 있다. 이 중 유압댐퍼와 공압 방식을 활용한 무게 구현 방식을 일부 채택하기도 하였다. 다만, 이 방식은 안전하고 다양한 운동 옵션을 제공하지만, 사용자가 운동 시 운동 강도를 조절하여 일정한 근력 운동을 하지 못하는 한계가 존재한다. 또한, 유압댐퍼/공압 방식은 고가이며 유지 보수 비용이 높고 공간을 많이 차지하는 단점이 있다. 이에 대한 대안으로 '디지털 웨이트 머신(DWM)'이라 불리는 디지털 방식의 운동 기구가 개발되었으며, 전동기형 웨이트 머신과 전기 유압형 웨이트 머신이 있다. 이 연구에서는 이 두 기술을 비교하고 전기 유압 운동 기구의 작동 알고리즘을 핵심적으로 다룬다. 전동기형 웨이트 머신은 전기 모터를 사용하여 근력 운동을 가능하게 하고, 컴퓨터화된 제어 시스템으로 사용자가 운동을 조절할 수 있다. 반면에 전기 유압 운동 기구는 큰 동력에 필요한 무게를 쉽게 조절할 수 있고, 유압 액추에이터를 통해 부드럽고 정확한 무게감을 제공한다. 본 연구는 이 두 기술의 장단점을 비교하고, 개발 전기 유압 운동 기구 프레임과 제어기를 소개하며 50 kg, 100 kg 무게 테스트 결과를 제공한다. 결론적으로, 이 연구는 디지털 운동 기구로 패러다임 전환에 필요한 센서와 유압 액추에이터에 대한 논의와 개발 제어 알고리즘을 제시한다.

목 차

국문요약	1
목차	2
표 목차	4
그림 목차	5
1. 서 론	6
1.1 연구 배경 및 목적	6
1.2 연구 파급성	9
2. 제안 시스템	10
2.1 개발 연구 목표	10
2.2 제안 유압 시스템	12
2.3 선 정의된 시스템 사양을 사용하여 비용 함수를 계산	15
2.4 MATLAB을 이용한 최적화 문제 해결	16
3. 설계	18
3.1 주 제어 보드	18
3.1.1 메인 제어 보드 설계	18
3.1.2 제어 보드 설계	19
3.1.3 중앙처리장치	20
3.1.4 전력 공급 모듈	20
3.1.5 앰프회로	21
3.1.6 릴레이 모듈	21
3.1.7 PCB 설계	22
3.1.8 제어 보드 디스플레이	23
3.2 제어 알고리즘	25
3.2.1 부하 조절 알고리즘	25

3.2.2 디스플레이 시스템 제어 알고리즘	27
3.3 기계 설계	28
3.3.1 유압 파워팩 설계	28
3.3.2 랫 폴 다운 기구 프레임 설계	29
3.3.3 체스트 프레스 기구 설계	31
4. 실험	33
4.1 실험 결과	33
4.1.1 부하 센싱 캘리브레이션	33
4.1.2 부하 설정 캘리 브레이션	34
4.2 부하 조절 평가	37
4.2.1 정확도 평가	37
4.2.2 최대 부하 평가	40
4.2.3 LED 속도 테스트	41
5. 결론	42
참고문헌	43
영문 요약	46

표 목차

Table 1 Main requirements for the proposed powerpack design

Table 2 The parameters of components

Table 3 Inputs/Outputs of the main control board

Table 4 Specifications of LED panel components

Table 5 Parameters of hydraulic powerpack

Table 6 Technical parameters of lat pull down machine

Table 7 Technical parameters of chess press machine

Table 8 Pressure and Actual Load Data for Calibration

Table 9 Test results with 5 test cases

Table 10 Maximum Load Test

Table 11 LED Speed Test Results

그림 목차

- Fig. 1 Type of conventional weight machine applied by (a) weight bar (b) hydraulic damper (c) Pneumatic device
- Fig. 2 Type of digital weight machine : (a) tonal (b) speediance (c) gymera
- Fig. 3 Type of digital weight machine : (a) two arm machine (b) chest press
- Fig. 4 Real User Hydraulic weight machine demonstration
- Fig. 5 Future work: Workout Data based app, AI workout posture correction trainer and VR rowing machine demonstration
- Fig. 6 The overall digital weight machine system
- Fig. 7 The schematic of the hydraulic powerpack
- Fig. 8 Schematic diagram of the optimal system specification selection
- Fig. 9 The block diagram of the load control system
- Fig. 10 The ESP32-based central processing unit
- Fig. 11 Power Supply Module
- Fig. 12 The schematic of amplifiers
- Fig. 13 The schematic of relay module
- Fig. 14 The 3D view of the PCB
- Fig. 15 Schematic of the PCB design for main control board
- Fig. 16 The block diagram of display subsystem
- Fig. 17 The commercial Arduino Uno board
- Fig. 18 Load control algorithm
- Fig. 19 Display control algorithm
- Fig. 20 The real hydraulic powepack
- Fig. 21 The 2D drawing of hydraulic powepack design
- Fig. 22 The 3-D design of Lat Pull Down Machine
- Fig. 23 The 3D Design of the Chess Press Machinet
- Fig. 24 Validation of Calibration process
- Fig. 25 Load Setting Calibration Result
- Fig. 26 Loadcell Indicator Calibration Result
- Fig. 27 Load setting 50kg test results
- Fig. 28 Load setting 100kg test results
- Fig. 29 Maximum Load setting 130kg test results
- Fig. 30 Real user demonstration for LED Speed Test Results

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

코로나 팬데믹 이후, 건강을 유지하기 위한 운동에 관한 관심이 높아지면서 운동 시설뿐만 아니라 가정에서의 기능적인 육체 활동에 관한 관심도 크게 높아졌다. 현재 대다수의 근력 운동 장비는 전통적인 무게판을 사용하는 아날로그 방식으로 운영되고 있어, 이로 인해 운동 중 안전 문제가 발생할 수 있다[1]. 더불어, 높은 강도의 운동을 위해 추가 중량 원판이 필요하고, 이로 인해 시간과 사용자의 불편함이 증가할 수 있다.

이러한 위험과 불편함을 해결하기 위해, 그림 1과 같이 (a) 다양한 중량 원판을 대체하는 대표적인 무게 구현 방식으로는 (b) 유압 댐퍼(damper)와 (c) 공압(pneumatic) 방식이 있습니다.



Fig. 1 Type of conventional weight machine applied by (a) weight bar (b) hydraulic damper (c) Pneumatic device

유압 댐퍼와 공압 방식을 활용한 운동기구는 주로 저항 운동을 수행하며, 용도에 따라 유산소 운동, 근력 운동, 재활 운동 등 다양한 목적으로 활용된다[2]. 이러한 기구들은 주로 피트니스 센터나 개인 홈 짐에서 찾아볼 수 있으며, 다양한 운동기능을 선택적으로 제공한다. 유압 댐퍼와 공압 방식을 활용한 운동기구는 조절 가능한 저항, 관절 부담 감소, 다양한 운동 옵션 등의 공통적인 장점이 있다[3, 4]. 특히, 유압 댐퍼/공압 운동기구는 사용자가 운동 강도를 유체 압력을 조절하여 쉽게 조절할 수 있는 저항 기능을 제공한다. 이를 통해 사용자는 개별적인 신체 조건과 운동 목표에 따라 저항 부하를 조절할 수 있다. 또한, 유압 댐퍼/공압 운동기구는 댐핑 효과를 통해 관절에 부담을 주지 않으면서 근육을 효과적으로 집중하여 강화할 수 있다. 이러한 특

성들은 사용자들이 안전하고 효과적으로 운동을 수행할 수 있도록 도와준다.

이는 운동 중 부상의 위험을 줄이면서 안전한 운동을 수행할 수 있도록 한다. 마지막으로, 이 운동기구는 다양한 운동 옵션을 유연하게 제공하므로, 근력 향상, 심혈관 운동, 체력 감량 등 본인의 목표와 체력 수준에 알맞은 맞춤형 운동이 가능하다.

그러나, 유압 댐퍼 및 공압 구동 방식의 운동 기구는 각각 별도의 무게부 오일을 포함한 댐퍼 및 공기조절판, 그리고 압축기가 필요하다. 이로 인해 이 기구들은 설치에 상당한 공간을 차지하여 추가적인 공간이 확보되어야 한다. 더불어, 이러한 기구들은 정기적인 부품 교체와 기계 유지보수가 필요하다. 특히, 이러한 운동기구들은 필연적으로 운동 무게 설정 시 수동적으로 유체 압력을 조절하여 무게를 조절해야 한다. 그 결과, 압력 조절을 통한 정확한 무게 설정이 어렵기 때문에 이러한 기구들은 주로 재활 용도로 국한하여 활용되고 있다[5-9].

즉, 이와 같은 중량 원판 대체 무게 방식은 수동적인 조절의 한계를 가지고 있어, 이러한 제약을 극복하기 위해 정확한 무게 설정을 가능케 하는 능동적인 제어 방식이 도입된 기구가 필요하다.

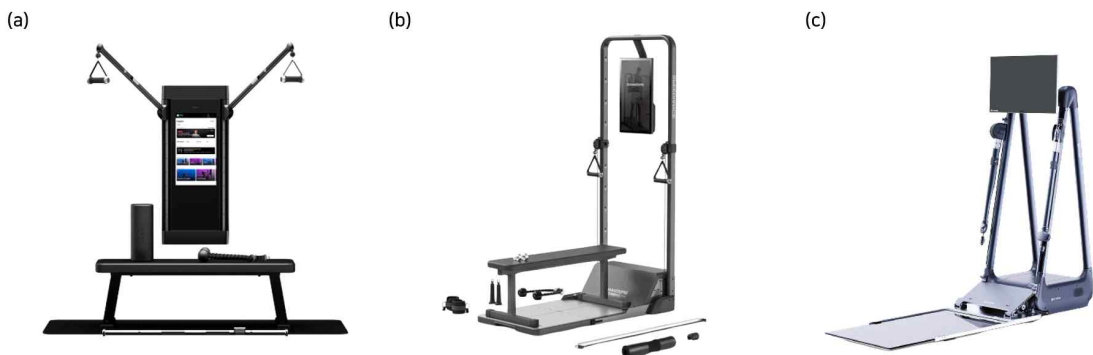


Fig. 2 Type of digital weight machine : (a) tonal (b) speediance (c) gymera

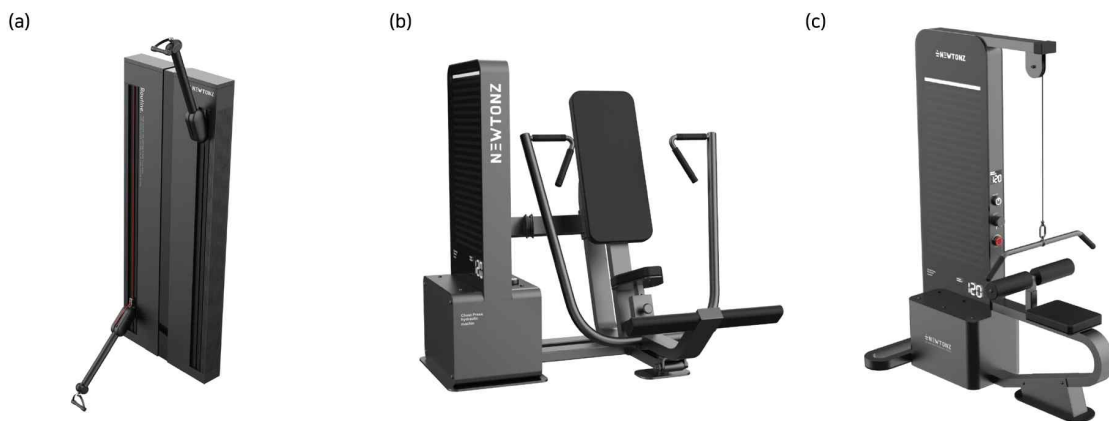


Fig. 3 Type of digital weight machine : (a) two arm machine (b) chest press machine (c) let pull down

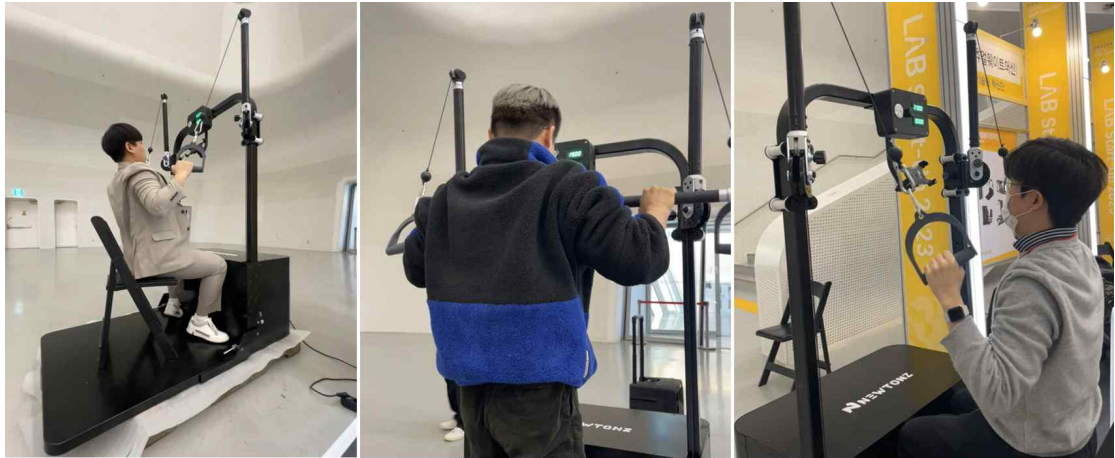


Fig. 4 Real User Hydraulic weight machine demonstration

본 논문에서는 능동형 액추에이터를 도입하여 기존 기구들의 한계를 극복한 혁신적인 기구로 '디지털 웨이트 머신(DWM)'을 제안한다. 이 디지털 방식의 무게 효과를 갖는 DWM은 기존의 근력 운동 방식을 정밀하고 안전하게 대체하는 기술개발에 많은 주목을 받고 있다. 여기, DWM은 능동형 액추에이터를 통해 디지털 제어를 가능케 하여 사용자가 무게를 더욱 정확하게 설정하고 조절할 수 있다. 이로써 기존의 수동 조절 방식에서 발생했던 정밀성 및 안전성의 문제를 극복하고, 사용자가 더 효과적으로 근력 운동을 수행할 수 있도록 도와준다. 추가로, DWM의 개발은 근력 운동 분야에서 혁신적인 기술의 도입을 시사한다. 그러므로, 이 디지털 웨이트 머신이 기존 운동기구에 대한 대안으로서 많은 관심을 받는 이유를 논문에서 상세히 다룬다.

대표적인 디지털 웨이트 머신(DWM) 종류로는 Fig. 2에서 나타난 전동기형 웨이트 머신과 전기 유압형 웨이트 머신이 있다. 국제적으로는 tonal[10], speediance[11], gymera[12]와 같은 기업이 전동기형 무게 설정 운동기구를 제공하고 있으며, 국내에서는 Newtonz[13]가 전기유압 방식의 운동기구를 개발하고 있다. 본 논문은 Fig. 2-3과 같이 전기 모터와 전기유압 기술이 차세대 스마트 운동기구는 전기유압을 활용한 디지털 운동기구 시스템을 개발/테스트하여 새로운 운동 방식 검증은 목표한다.

대다수의 전동기형 웨이트 머신은 내장된 전기 모터를 갖추고 있으며, 이 모터는 외부 전원을 공급받아 케이블에 연결되어 사용자가 근력 저항 운동을 수행할 수 있게 회전 운동을 생성한다. 작동 방식은 컴퓨터화된 제어 시스템에 의해 조절되며, 사용자는 제어 패널 또는 모바일 앱을 통해 운동 설정을 자유롭게 조절할 수 있다. 또한, 본 기구는 다양한 센서를 활용하여 사용자의 움직임, 자세, 신체 상태, 심박수 등을 실시간으로 측정하여 운동 중의 사용자 상태를 추적할 수 있다[14-18]. 전기유압 운동기구는 주로 하체 운동과 같은 큰 동작에 의한 근력 저항 운동을 위한 무게 설정에 용이하다. 사용자는 유압 액추에이터를 활용하여 강력한 힘을 생성하여 운동 시에 부드럽고 정확한 무게감을 제공하며, 효과적이고 안전한 근력 운동을 수행한다.

1.2 연구 파급성

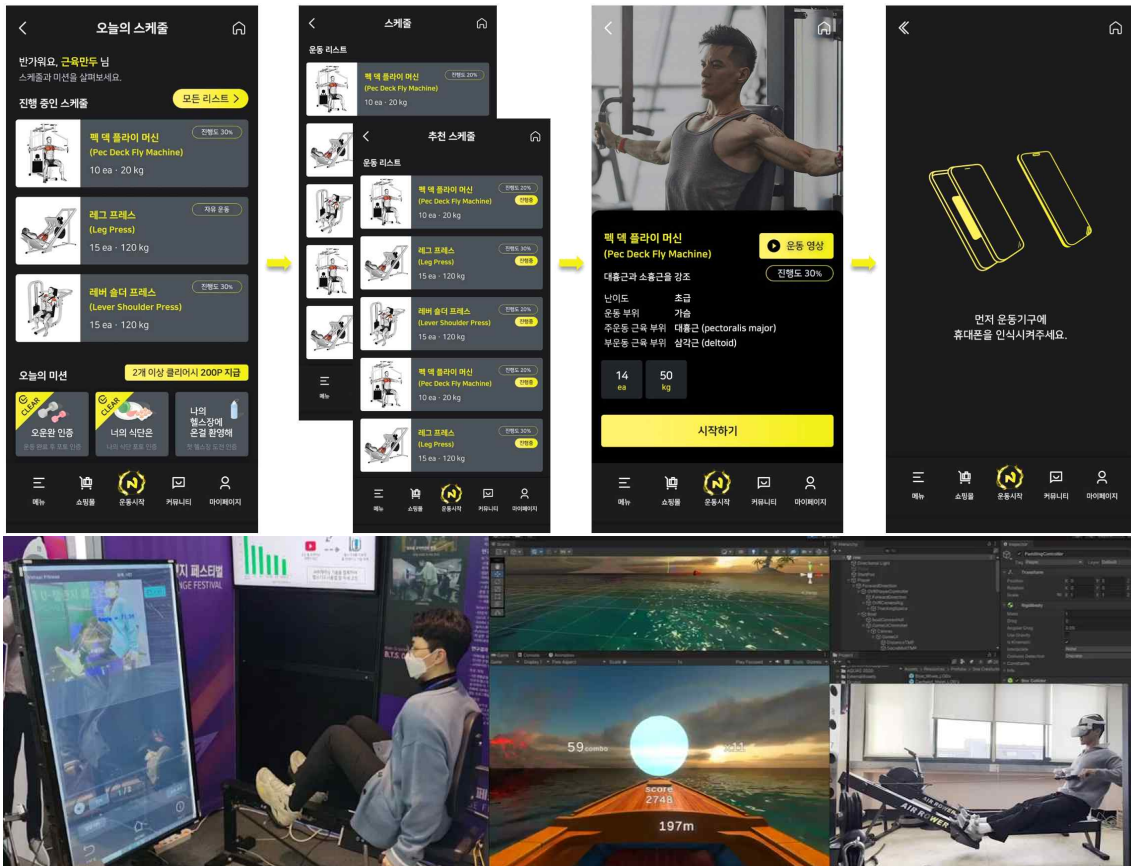


Fig. 5 Future work: Workout Data based app, AI workout posture correction trainer and VR rowing machine demonstration

본 논문에서 다루는 디지털 웨이트 머신은 편의상 무게부를 중량 원판 대체 가능한 전기 모터와 전기 유압 액추에이터를 적용한 기구를 의미한다. 스마트 운동기구에 대한 수요 증가로 인해 국내외 다수의 기업과 연구원이 이질감 없고 정밀한 무게를 내는 무게부의 제어 알고리즘, 머신 컨트롤러, 사용자 친화적 운동 기구학 설계, 위기 상황 인지 자동 안전장치 등에 관한 다양한 연구를 진행하고 있다. 최근 운동기구 분야에서는 AI, 인공지능, VR(Virtual Reality), AR(Augmented Reality) 등의 기술을 활용하여 단순 근력 훈련이 아닌 데이터와 콘텐츠를 기반으로 한 재미를 더한 게임이 피케이션을 추구하고 있다[19-23].

이에 따라 스마트 운동기구는 이러한 데이터를 정확하게 측정하는 센서와 기능을 구현하는 액추에이터가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 전반적인 디지털 운동기구 중 전기유압 액추에이터를 사용한 운동기구를 대상으로 설계하고, 자체 개발한 전기유압 운동기구 프레임 및 이를 탑재한 제어기에 대한 논의를 다룬다. 이와 함께, 액추에이터의 역할과 중요성에 대한 명확한 이해를 바탕으로 효율적인 운동기능과 안전성을 확보하는 데에 중점을 두고 설계되었다. 마지막으로, Fig. 3과 같이 개발한 모델을 실제 사용자들에게 시험 및 테스트한 결과를 제시한다.

2. 제안 시스템

2.1 개발 연구 목표

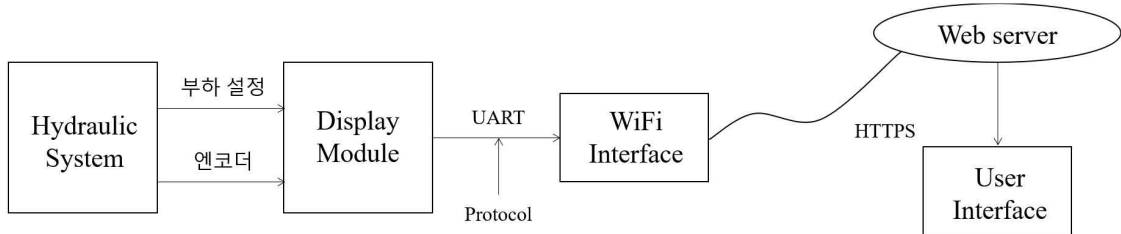


Fig. 6 The overall digital weight machine system

전반적인 디지털 운동 기구 시스템은 전기 유압기를 이용한 무게 설정 부분과 이를 압력센서로 측정된 운동 정보를 Wifi 인터페이스를 통해 웹서버로 송/수신하는 데 있다 (Fig. 6 참고). 이 운동 정보는 운동 시 측정된 압력 정보를 환산하여 무게/운동 횟수를 바탕으로 사용자가 애플리케이션에서 확인할 수 있도록 설정한다.

본 논문에 주요 목표는 사전 정의된 요건을 충족시키는 최적 유압 시스템 구성을 조사하는 것이다. 제안된 유압 시스템 기반의 디지털 운동 기구에 대한 주요 요구 사항은 Table. 1에 정리되어 있다. 최대 작동 압력은 기구 손잡이에서 최대 하중이 약 130kg과 되도록 설계되어야 하며, 발생 하중은 전체 하중 범위 내에서 설정된 하중과의 제어 오차가 설정된 값의 $\pm 8\%$ 이내로 정확하게 조절되어야 한다. 또한, 설정된 하중 수준을 시각화하기 위해 LED 패널이 부착되어 있으며, 더 나아가 LED의 움직임은 운동을 할 때 인간의 움직임을 모방하며, 최소 속도는 0.3m/s이다.

Table 1 Main requirements for the proposed powerpack design

No.	Specification Target	Target Value
1	Maximum load	130 kg
2	Control accuracy	92% of desired load
3	Regulation resolution	1 kg
4	LED panel	Equivalent to human motion

마지막으로 설계된 유압식 파워팩, 프로그래밍한 제어 보드, LED 패널을 선택하여 대표적인 근력 운동 기구 2종 Lat Pull Down 및 Chest Press 기계에 적용하여 검증 및 평가를 수행한다.

2.2 제안 유압 시스템

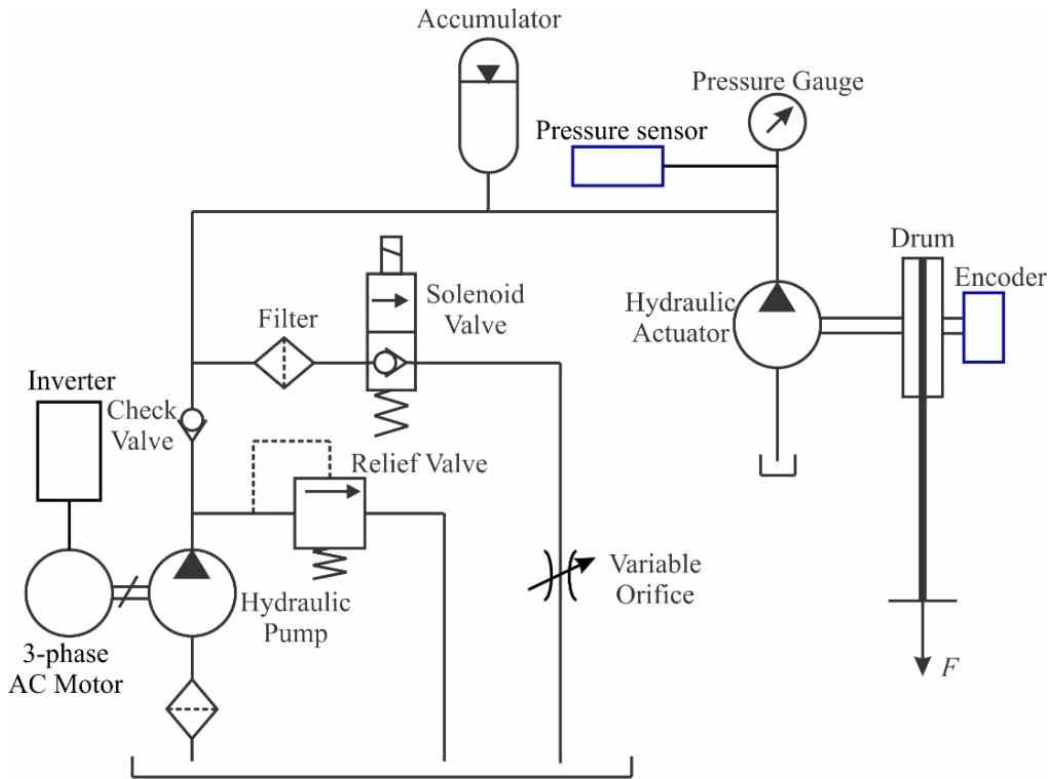


Fig. 7 The schematic of the hydraulic powerpack

본 유압 시스템의 회로도에는 3상 AC모터, 유압펌프, 솔레노이드 밸브, 어큐물레이터 등 Fig.7과 같이 구성되며, 작동 원리는 다음과 같다. 먼저, 생성된 하중은 유압 액추에이터 내부의 압력에 의존함을 주목해야 한다. 액추에이터의 압력을 변경하기 위해 3상 AC 전동 모터로 구동되는 유압펌프를 사용했으며, 운동 시 급격한 압력 변화에 대비하여 압력 에너지를 저장하고 에너지 충·방전이 가능한 어큐물레이터를 사용한다. 운동 중에 액추에이터에서 나오는 유압 오일은 사용자가 손잡이를 당길 때 어큐물레이터로 피드백되고, 손잡이를 당기지 않을 때 어큐물레이터에서 액추에이터로 유압 오일이 공급된다. 이에 따라 구동기에 공급해야 하는 유압 오일의 양이 크게 줄어든다. 또한, 시스템 압력을 낮추기 위해 가변 오리피스와 함께 솔레노이드 밸브를 사용하였다. 이러한 오리피스를 통한 유량 조절은 수동으로 그 개방 면적을 변경함으로써 가능하다. 또한, 전동 모터의 샤프트는 유압펌프의 샤프트에 견고하게 연결되어 있으므로, 3상 교류 모터의 속도를 조절함으로써 고정변위 유압펌프의 유량을 조절할 수 있다. 마지막으로, 시스템 압력과 사용자의 움직임을 계속해서 모니터링하기 위해 압력센서와 증분 엔코터를 적용하였다.

2.2 시스템 모델링 & 최적화

시스템 사양을 최적화하기 위해 다음 절차를 수행해야 한다:

단계 1: 시스템 모델링 및 최적화 문제 정의

단계 2: 미리 정의된 시스템 사양으로 비용 함수를 계산하기 위한 단계별 프로세스 작성

단계 3: MATLAB에서 최적화 도구를 사용하여 최적화 문제를 해결식을 설정하기 전에, 기호는 다음과 같다.

γ - Specific heat ratio

P_p - Accumulator pre-charged pressure

V_T - Accumulator total volume (air volume at pre-charged pressure)

P_0 - System pressure at lowest exercise position

P_{a0} - Accumulator pressure at lowest exercise position

V_{F0} - Fluid volume at the lowest exercise position

F_0 - Human force at the lowest exercise position

R_{dr} - Drum radius

D_m - Hydraulic motor (pump) displacement

D_p - Hydraulic pump displacement

N - gear ratio ($N=1, 2, 3, \dots$)

K_{RDN} - A coefficient defined to simplify the mathematic model

η_{tp}, η_{tm} - Torque efficiency of hydraulic pump and motor, respectively

η_{vp}, η_{vm} - Volumetric efficiency of hydraulic pump and motor, respectively.

$Q_p(t)$ - Pump output flow at time t

$P(t)$ - Pressure at time t

$W_{elec}(t)$ - Electric power at time t

ω_p - Electric motor rotation speed

ΔP_a - Accumulator pressure difference between the highest and lowest exercise positions

ΔV_f - Accumulator fluid volume difference between the highest and lowest exercise positions

ΔP - System pressure difference between the highest and lowest exercise positions

ΔV_m - Volumetric change in the hydraulic motor between the highest and lowest exercise positions

Δs - Exercise stroke

ΔF - Human force change between the highest and lowest exercise positions

F_{omed} - The medium load force (around 2/3 of the F_{0max})

ω_{pmed} - The medium rotation speed of the electric motor.

이 시스템 모델은 다음과 같다.

Accumulator

$$P_{a0}(V_T - V_{F0})^\gamma = P_p(V_T)^\gamma$$
$$P_{a0} = \begin{cases} P_p & \text{if } P_0 \leq P_p \\ P_0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Accumulator

$$(P_{a0} + \Delta P_a)(V_T - V_{F0} - \Delta V_f)^\gamma = P_p(V_T)^\gamma$$
$$\Delta P_a = \begin{cases} P_p - P_{a0} & \text{if } P_0 + \Delta P \leq P_p \\ P_0 + \Delta P - P_{a0} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Motor & Drum

$$P_0 = \frac{2\pi F_0}{\eta_{im}} \frac{R_{dr}}{D_m N} = \frac{2\pi F_0}{\eta_{im}} \times K_{RDN}$$

$$K_{RDN} = \frac{R_{dr}}{D_m N}$$

Motor & Drum

$$\Delta V_m = -\Delta V_p$$

$$\Delta V_m = \frac{\Delta s}{2\pi\eta_{vm}} \frac{D_m N}{R_{dr}} = \frac{\Delta s}{2\pi\eta_{vm}} K_{RDN}$$

$$\Delta P = \frac{2\pi\Delta F}{\eta_m} \frac{R_{dr}}{D_m N} = \frac{2\pi\Delta F}{\eta_m} K_{RDN}$$

Electric motor

$$W_{elec}(t) = \frac{Q_p(t)P(t)}{\eta_{vp}\eta_p}$$

Pump

$$Q_p(t) = \eta_{vp} D_p \omega_p$$

$$T_p(t) = \frac{D_p P(t)}{2\pi\eta_p}$$

이에 근거하여 최적화된 식은 다음과 같다.

Known system parameters:

$$V_T, \Delta s, \eta_{vm}, \eta_{lm}, \eta_{vp}, \eta_p, \gamma,$$

$$F_0 = F_{\min} \rightarrow F_{\max},$$

Constraints:

$$P_{p\min} \leq P_p \leq P_{p\max}$$

$$\frac{R_{dr\min}}{D_{m\max} N_{\max}} \leq K_{RDN} \leq \frac{R_{dr\max}}{D_{m\min} N_{\min}}$$

$$D_{p\min} \leq D_p \leq D_{p\max}$$

Settling time for low load condition

$$\frac{V_{F_low}(F_{0low})}{Q_p} < T_{\max}$$

Limited electronic power:

$$W_{elec}(F_{0med}, \omega_{pmed}) < W_{elec_max}$$

Limited system pressure:

$$P_0 + \Delta P|_{F_0=F_{0\max}} \leq P_{\max}$$

Problem: Find P_p, K_{RDN}, D_p to satisfy all constraints and minimize the cost function

$$\max(\Delta P/P_0) \text{ with } F_{0\min} \leq F_0 \leq F_{0\max}.$$

2.3 선 정의된 시스템 사양을 사용하여 비용 함수를 계산

해석된 비용 함수 결과를 기반으로 최적화 알고리즘을 사용하여 시스템 사양을 결정할 수 있다. 이 비용 함수는 최소화하거나 최대화하려는 목표를 나타내며, 시스템의 성능 및 비용과 관련된 요소를 수학적으로 표현하며, 주로 시스템 사양의 변수에 의존한다. 여기, 1차 비용 함수에 대한 해석은 다음과 같다. 이때, P_p, K_{RDN}, D_p, F_0 는 아는 값으로 가정한다.

Step 1: Calculate the P_0

$$P_0 = \frac{2\pi F_0 K_{RDN}}{\eta_{lm}}$$

Step 2: Calculate the initial states of accumulator:

$$P_{acc0} = \begin{cases} P_0 & \text{if } P_0 > P_p \\ P_p & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{F0} = \begin{cases} V_T - V_T \left(\frac{P_p}{P_{acc0}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} & \text{if } P_0 > P_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Step 3: Calculate the increased term ΔV_m at the maximum exercising stroke:

$$\Delta V_m = \frac{\Delta s}{K_{RDN} 2\pi \eta_{vm}}$$

Step 4: Calculate the increased term ΔP at the maximum exercising stroke:

$$\begin{aligned} \Delta V_F &= -\Delta V_m \\ \Delta P_{acc} &= \frac{P_p V_T^\gamma}{(V_T - V_{F0} - \Delta V_F)^\gamma} - P_{acc0} \\ \Delta P &= P_{acc0} + \Delta P_{acc} - P_0 \end{aligned}$$

Step 5: Get the 1st-layer cost function: $\Delta P / P$.

2차 비용 함수:

다음 절차는 미리 정의된 부하 조건 F_0 에만 적용되는 것으로서, 상기 기기는 부하 범위 내에서 동작해야 하므로, 제 2차 계층 비용 함수는 수식 (1)과 같이 계산되는 것을 특징으로 한다.

$$\max \left(\frac{\Delta P}{P} \right)_{F_0 = F_{0min} \rightarrow F_{0min}} \quad (1)$$

수치 계산을 위해 범위는 N개의 점으로 나누어지며, 비용 함수는 수식 (2)과 같이 계산된다.

$$\max\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{F_0 = F_{0i}, i = 1, N} \quad (2)$$

2.4 MATLAB을 이용한 최적화 문제 해결

비용 함수를 계산한 후 최적화 알고리즘은 MATLAB에서 “FminConfig” 기능을 기반으로 적용할 수 있다. 이 기능은 선형 또는 비선형 등식/부등식 제약 조건을 가진 최적화 문제에 대한 솔루션을 제공한다. 자세한 설명은 MATLAB fmincon (mathworks.com)에서 찾을 수 있다. 최적화 알고리즘의 개략적인 다이어그램은 Fig.8 에 나와 있으며, 최적화 결과는 Table 2에 설명되어 있다.

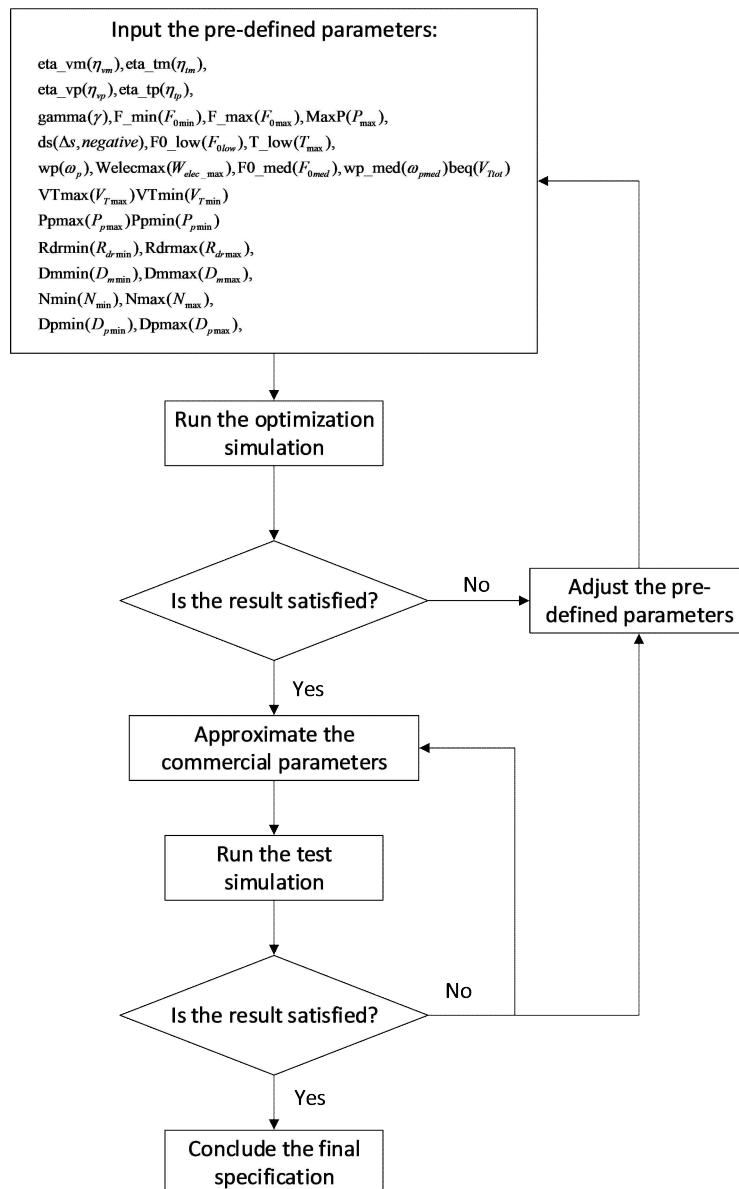


Fig. 8 Schematic diagram of the optimal system specification selection

Table 2 The parameters of components

No.	Component	Parameter
1	Hydraulic actuator	- Displacement: 37 cc/rev
2	Hydraulic pump	- Displacement: 2 cc/rev
3	Electric motor	- Power input: 3-phase 220VAC - Power: 750W (1HP) - Rated speed: 1430 rpm (revolution per minute)
4	Inverter	- Power supply: 1-phase 220VAC - Output: 3-phase 220VAC - Minimum Power: 1.5kW
5	Accumulator	- Volume: 1.4liter - Precharged pressure: 18bar
6	Pressure sensor	- Power supply: 24VDC - Measurement range: 0- 250bar - Signal output: 0-10V
7	Encoder	- Power supply: 5VDC - Resolution: 1024 ppr (pulse per revolution) - Signal outputs: A, B, Z
8	Drum	- Radius: 4 cm
9	Relief valve	- Setting pressure: 150bar

3. 설계

3.1 주 제어 보드

3.1.1 메인 제어 보드 설계

부하 제어 시스템의 구성도는 Fig. 9에 나와 있으며, 메인 제어 보드는 프로그래밍 및 실시간 데이터 전송을 위해 컴퓨터와 통신하는 가장 핵심 구성 요소이다. 게다가, 메인 제어 보드는 시작/정지 버튼, 압력센서, 설정 다이얼(potentiometer) 등으로부터도 신호를 수신한다. 이와 더불어, 메인 제어 보드는 그 내부 메모리에 프로그래밍된 제어 알고리즘을 실행한 다음, 솔레노이드 밸브 및 인버터와 같은 구동기에 제어 신호를 보내어 설정 다이얼을 통해 사용자가 설정한 부하를 정확하게 생성한다.

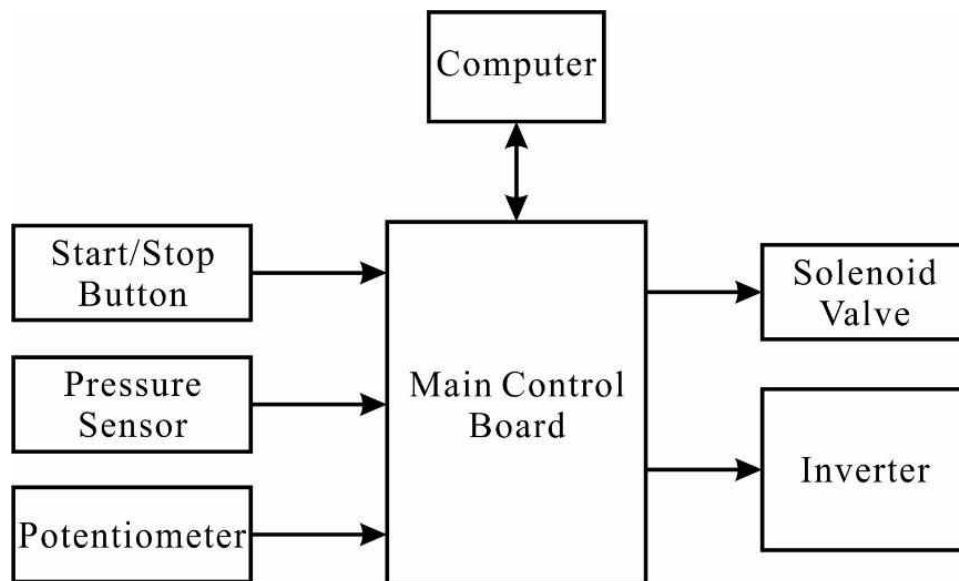


Fig. 9 The block diagram of the load control system

부하 제어 보드의 핵심 기능은 사용자가 설정 다이얼을 원하는 부하를 사용자 운동에 따라 최대한 정확하게 생성하는 것이다. 이러한 유사 무게 추적을 위해 유압 시스템에서 손잡이에 전달되는 부하와 동등한 압력을 계속 관찰하기 위해 압력센서를 사용한다. 사용자가 큰 무게로 운동하려면 시스템 압력을 증가시키는 과정이 필요하다. 이 시스템 압력을 높이기 위해 전기 모터는 펌프를 구동하기 위해 제어한다. 이때 압력 증가율은 전기 모터 구동 속도에 따라 변한다. 반대로 시스템 압력을 줄이기 위해서는 솔레노이드 밸브와 가변 개방 영역 오리피스를 포함한 압력 감소 메커니즘이 적용된다. 특히, 운동 중 안전하지 않은 상황이 발생할 수 있는데, 이 상황은 비상 버튼을 누르면 시스템이 전자적으로 동작이 중단되고 솔레노이드 밸브가 열리면서 시스템 압력이 몇 초 안에 0으로 감소한다.

부하 제어 보드의 사양은 사용되는 구성 요소에 따라 다음과 같이 정의된다:

Table 3 Inputs/Outputs of the main control board

N o.	Function	Specification
1	Monitoring the system pressure	Analog input: 01 (0-10V)
2	Setting load	Analog input: 01 (0-10V)
3	Controlling the inverter: - Run/stop inverter - Control the speed of the motor	- Digital output: 01 (Relay contact) - Analog output: 01 (0-10V)
3	Controlling the solenoid valve	Digital output: 01 (Relay contact 220VDC)
4	Run/stop machine	Digital input: 01
5	Safety	Digital input: 01

3.1.2 제어 보드 설계

부하 제어 시스템의 기능과 입력/출력 신호의 사양을 기반으로, 메인 제어 보드는 ESP32 마이크로프로세서를 바탕으로 설계하였다. 더 상세히, 부하 제어 보드의 주된 기능은 연결된 부하를 효과적으로 제어하는 것이다. 이는 전원의 공급, 차단, 또는 다양한 부하 조작 기능을 포함한다. 먼저, 입력 신호는 부하의 현재 상태 및 관련 센서에서 수집한 데이터를 입력으로 받는다. 특히, 외부에서 부하를 제어하기 위한 명령을 받을 수 있고, 통신 인터페이스를 통해 외부 시스템에서 오는 디지털 통신 신호를 입력으로 받는다. 출력 신호는 현재 부하 상태 및 센서 데이터를 외부 시스템에 보고하는 출력 신호를 생성한다. 통신 인터페이스는 외부 시스템 또는 상위 제어 시스템을 지원하며, 주로 디지털 통신 프로토콜을 통해 이루어진다. 상태 모니터링은 부하의 상태를 모니터링하고 필요한 경우 상태를 보고하는 기능을 포함한다. 부하 제어 보드의 구체적인 기능 및 입출력 신호 사양은 요구 사양에 Fig. 8에 나와 있는 것을 기반으로 시스템 구성하였다. 메인 제어 보드에는 다음과 같은 기능 블록이 포함되어 있다.

- Control Processing Unit
- Amplifier Block
- Communication Circuit
- Relay Module
- Power Supply
- Expander Module

3.1.3 중앙처리장치(Central Processing Unit)

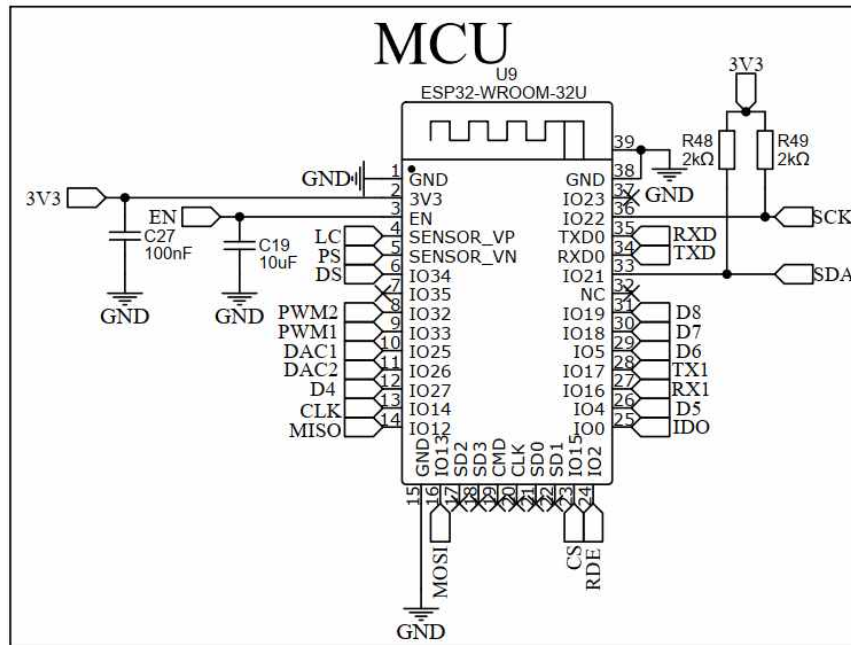


Fig. 10 The ESP32-based central processing unit

ESP32 마이크로프로세서는 하드웨어 자원을 기반으로 시스템 비용 절감을 위한 중앙 처리 장치로 사용되며, 이 장치의 개요는 Fig. 10에 나와 있다. ESP32-WROOM-32U는 강력하고 범용 Wi-Fi + Bluetooth + Bluetooth BLE MCU(Micro-Controller Unit) 모듈로 저전력 센서에서 가장 까다로운 작업에 이르기까지 다양한 응용 분야에 적용할 수 있으며, 아날로그 입출력 신호를 허용할 수 있는 해상도로 처리할 수 있다. 또한 I2C, SPI, UART 등 일부 통신 표준이 이미 통합되어 있어 연구 단계에서 상용 제품 제작까지의 시간을 단축할 수 있다.

3.1.4 전력 공급 모듈

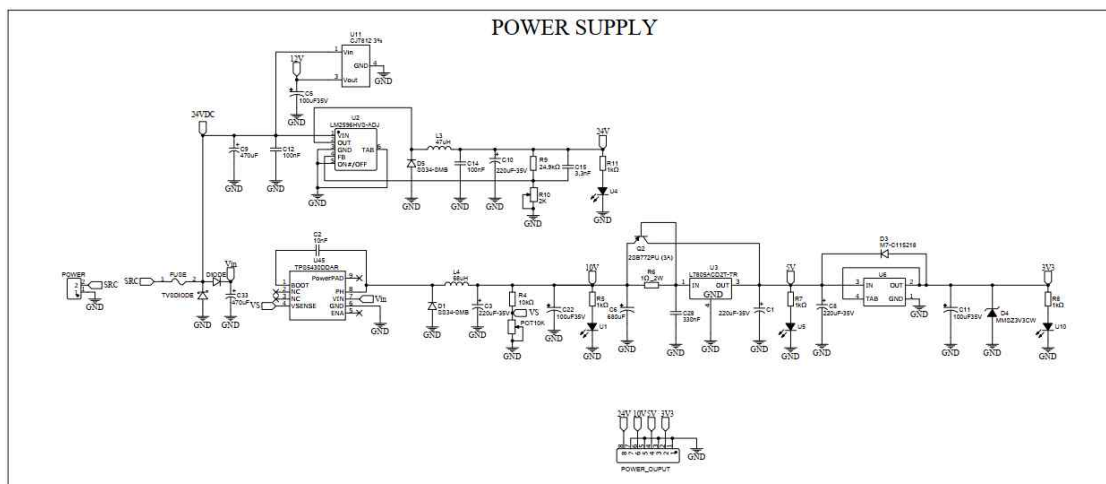


Fig. 11 Power Supply Module

전력 공급 모듈 개략도는 Fig. 11와 같이 나타나 있으며, 이 장치의 전력 입력은 24VDC이다. 이 제어 시스템의 일부 부품 및 주변 장치에 충분한 전력을 공급하기 위해서는 3.3VDC, 5VDC, 10VDC, 12VDC 등의 다양한 출력 전압을 생성하는 역할을 수행이 필요하다.

3.1.5 앰프 회로

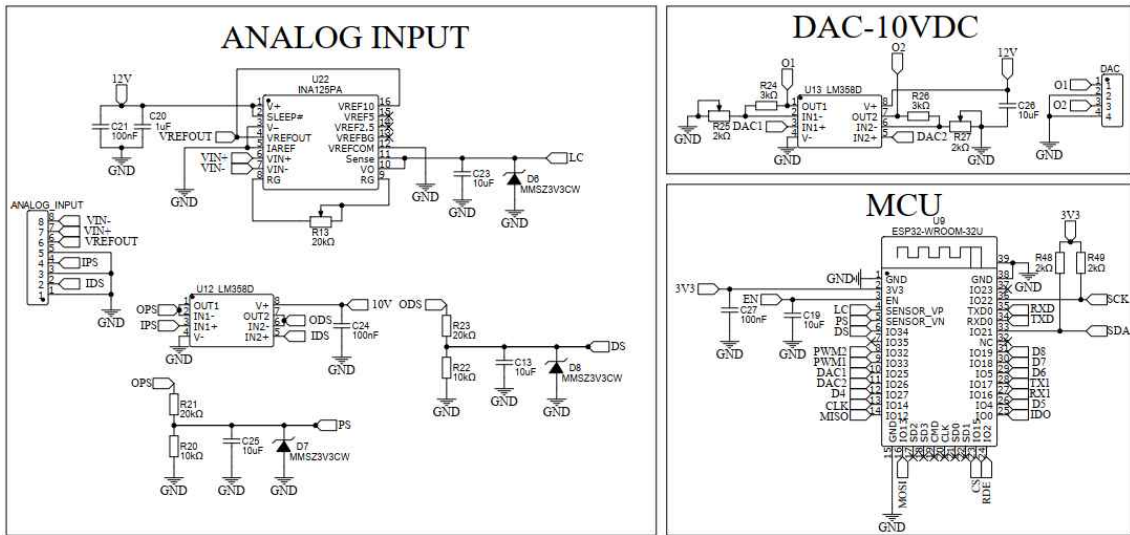


Fig. 12 The schematic of amplifiers

MCU는 최대 전압 레벨이 3.3VDC인 아날로그 입출력 신호만 한정적으로 가독할 수 있으므로 0-10VDC 범위에서 크기가 변하는 아날로그 신호를 처리하기 위해서는 Fig. 6과 같이 증폭기를 적용해야 한다 (참고 Fig. 12).

3.1.6 릴레이 모듈

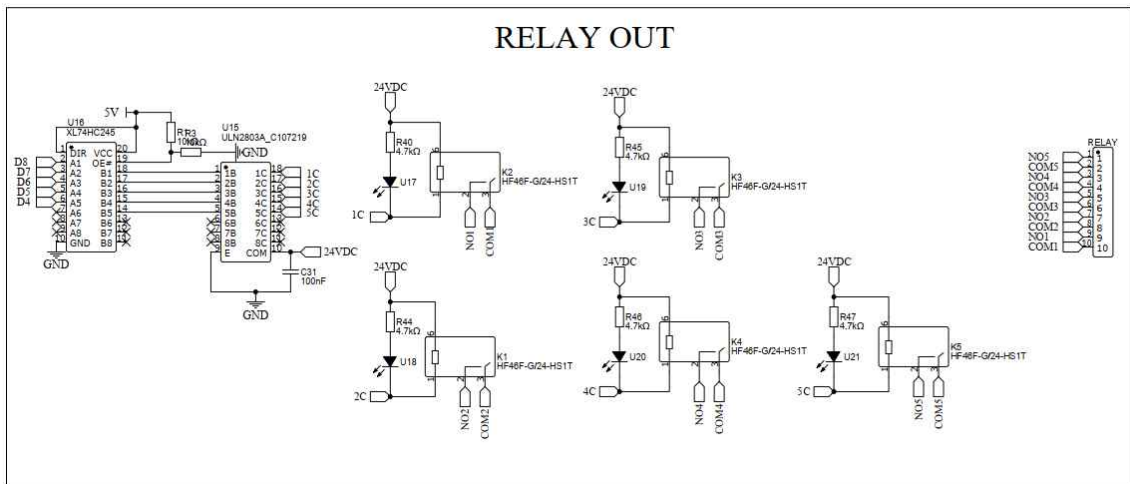


Fig. 13 The schematic of relay module

제어 시스템에서 사용되는 인버터 및 솔레노이드 밸브와 같은 장치를 제어하기 위해 릴레이 모듈이 메인 제어 보드에 설계되고 통합되어야 한다. 이 릴레이 모듈의 회로도는 Fig. 13에 표시된다.

3.1.7 PCB 설계

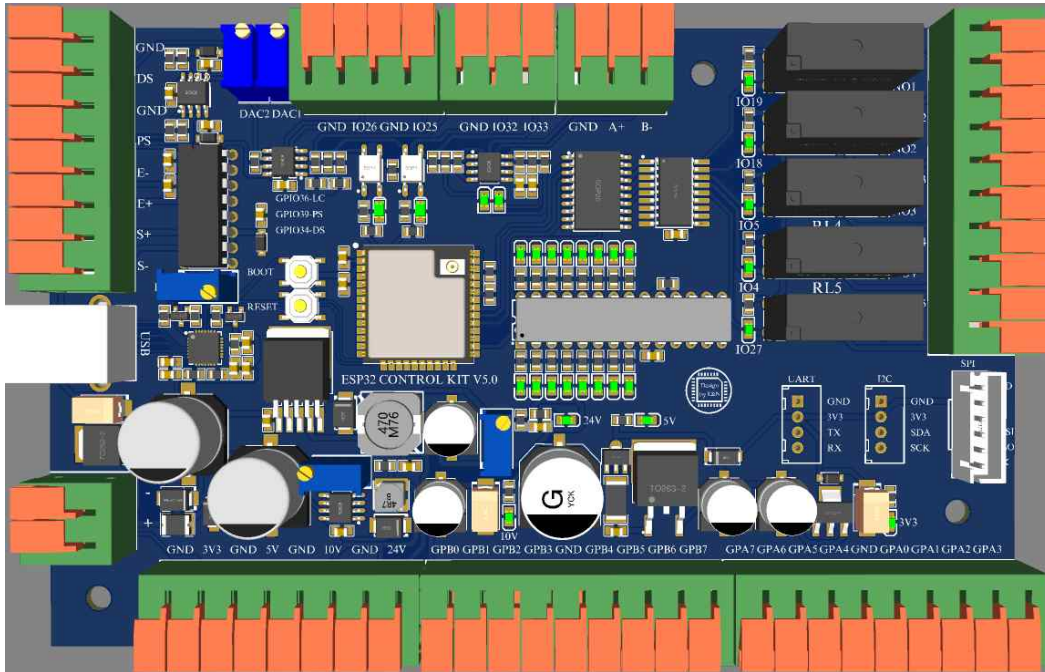


Fig. 14 The 3D view of the PCB

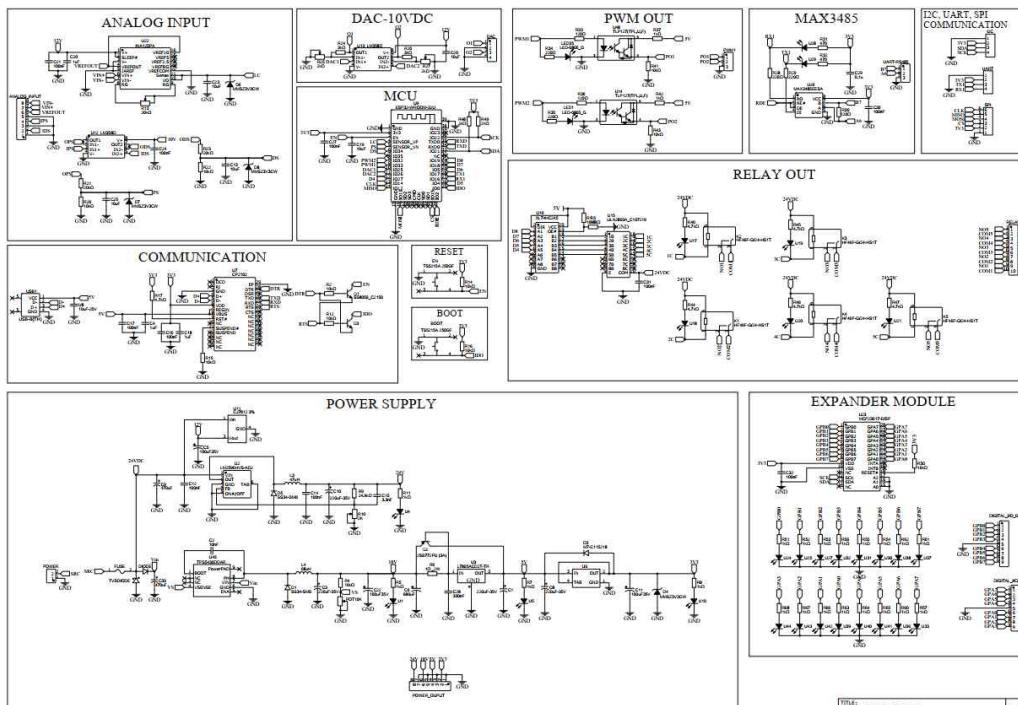


Fig. 15 Schematic of the PCB design for main control board

메인 제어 보드의 PCB 외관 형태는 Fig. 14과 같고 다양한 목적을 위한 PCB(인쇄 회로 기판)를 설계자가 만들 수 있도록 충분한 구성 요소를 제공하는 무료 회로 디자인 도구 EasyEDA를 사용하여 설계되었다. 이 메인 제어 보드에 적용되는 PCB 구성 요소들은 Fig. 15에 자세히 나타나 있다.

3.1.8 제어 보드 디스플레이

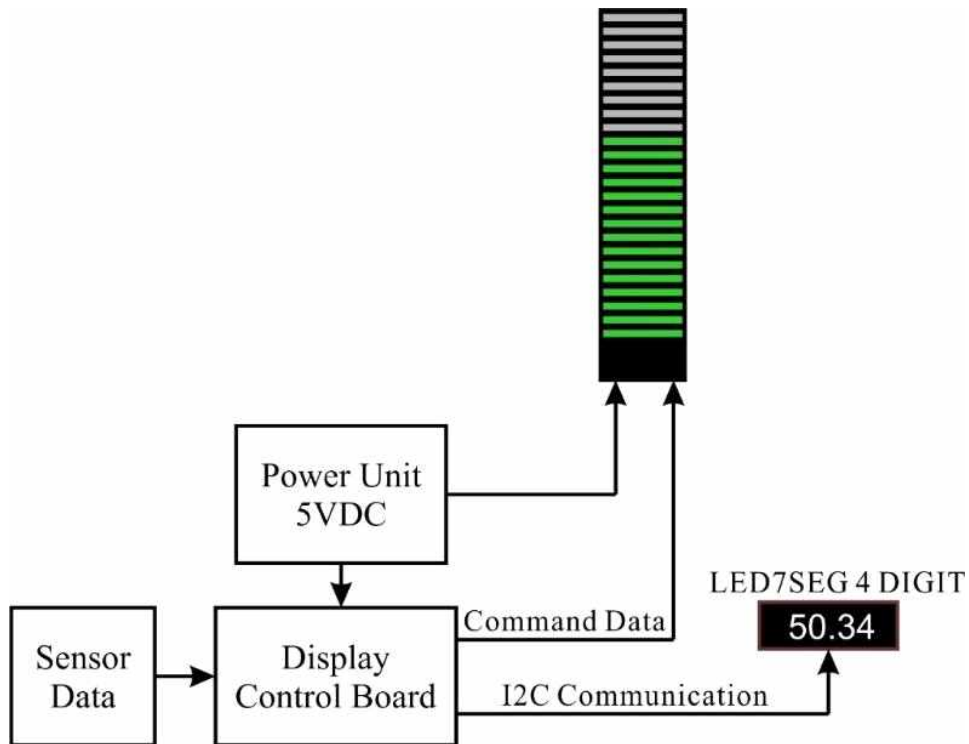


Fig. 16 The block diagram of display subsystem

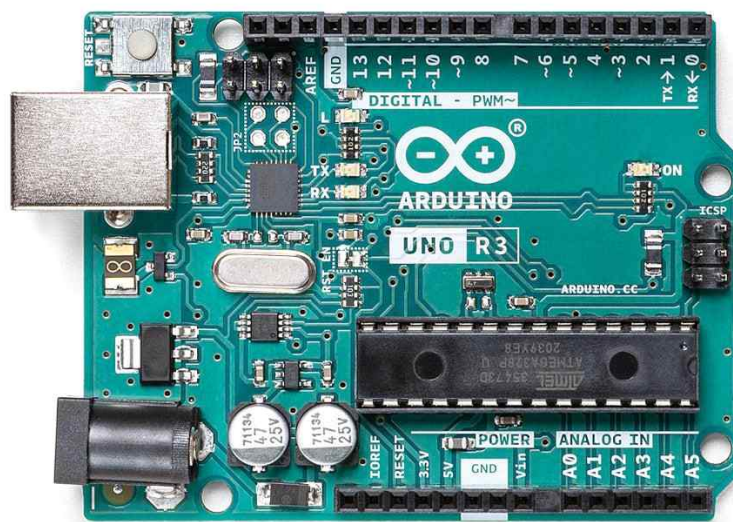


Fig. 17 The commercial Arduino Uno board

제안된 전기 유압 시스템 기반 디지털 무게 디스플레이 시스템 구성은 Fig. 16과 같이 묘사된다. 상용 Arduino Uno 보드를 사용한 LED 제어 보드 디스플레이는 Arduino Uno에 기반한 LED 조작 시스템을 의미한다. 이 Arduino Uno 보드는 마이크로컨트롤러 핵심 기능을 수행하며 디지털 핀을 사용해 LED를 제어한다. 특히, Arduino Uno 보드와 시리얼 통신을 통해 사용자에게 상태 정보나 디버그 메시지를 전달할 수 있다. 이 무게 디스플레이 방법은 기본적인 마이크로컨트롤러 기반 시스템으로서, 본 논문에 개발 디스플레이 컨트롤러 프로토타입으로 사용되었다.

LED 패널의 작동 원리는 다음과 같다. 설정 부하 포텐서미터와 증분 엔코더에서 나오는 신호가 마이크로컨트롤러 기반 제어 유닛에서 처리된다. 설정 부하 레벨을 표시하도록 설계된 일련의 단일 LED로 구성된 LCD 블록이 있다. 또한, 설정 부하는 LED 제어 보드와 I2C 통신 표준을 통해 통신하는 LED7SEG 기반의 수치 디스플레이에 표시된다. 덧붙여, 사용자의 상하 이동 동작은 설정 부하 레벨에 해당하는 LED 블록이 이동하는 형상이 LED 패널에 표시된다.

이 LED 제어 보드는 디스플레이 시스템의 모든 기능을 수행할 수 있는 충분한 하드웨어 자원을 포함한 Fig. 17과 같은 상용 Arduino UNO 보드를 사용하고 있다. 상기 기능에 따르면 디스플레이 제어 보드의 사양은 Table 4와 같다.

Table 4 Specifications of LED panel components

No.	Function	Specification
1	LED7SEGMENT 4 DIGIT Display	- Power supply: 5VDC - Control method: I2C communication
2	LED panel	- Power supply: 5VDC - Number of LEDs: 30 - LED Driver: WS2812B
3	Power unit	- Input: 220VAC - Output ports: 12VDC and 5VDC
4	Display control board	- Power supply: 12VDC - Digital output: 01 - Encoder input (A, B, 5VDC, GND): 01 - Analog input: 01 (0-5VDC) - I2C Communication: 01 (SCL, SDA, 5VDC, GND)

3.2 제어 알고리즘

3.2.1 부하 조절 알고리즘

유압 힘 제어 시스템에 실제 사용되는 제어 방법은 기본적으로 proportional-integral-derivative(PID) 제어[24]와 대표적인 고급 제어 방식으로 State estimate feedback, fuzzy control, backstepping, self-tuning fuzzy sliding mode, auto-tuning PID [25-33] 등의 고급 제어가 개발되었다. 본 논문은 전기 유압 방식 근력 운동 기구 개발하여 산업계에 사용할 수 있는 성능검증에 중점을 두기에 PID Feedforward(FF-PID) 제어 방식을 적용하였다[34].

개발 전기 유압 탑재 디지털 운동 기구는 PID 제어 시 몇 가지 한계가 있다. 첫째, 본 시스템은 압력을 제어하기에 비선형 시스템에서 취약하다. 또한, 제어 대상이 사람이기에 불확실하고 외부 간섭에 대한 예러값이 발생한다. 이러한 이유로, 이러한 비선형적이고 오차를 줄이기 위해 FF-PID 제어를 통해 원하는 압력값의 보정할 수 있다. 이 FF-PID 제어 함수는 식 3과 같다.

$$u = k_p \cdot e + k_I \int e(\tau) d\tau + k_D \frac{de}{dt} + k_{ff} \cdot (Load\ setting) \quad (3)$$

$$e = Load\ Setting - Load\ Actual \quad (4)$$

이때, k_p, k_I, k_D 는 상수값이다.

FF-PID 제어는 제어 입력에 대한 피드백 신호 외에도 추가적인 정보를 사용하여 시스템을 제어 정확도를 향상해주는 방법이다. 이 제어 방식에서는 먼저 예상 출력에 대한 제어 입력을 계산하고, 이를 피드백 제어 입력에 더한다. 초기에, 사용자는 개발된 운동 기구의 무게를 더 정확하게 제어하기 위해 원하는 무게값(Load Setting)을 설정한다. 이때, 실제 유압 장치에서 발생하는 무게(Load Actual)의 오차를 최소화하기 위한 과정이 필요하다. 앞서 언급한 압력 제어에 따른 비선형성은 오차가 증가하면 압력 손실이 발생하므로, 이를 보정하기 위한 방법이 필요하다. 이 오차는 식 4를 통해 설정값에서 실제 부하 값을 뺀 값으로 정의한다. 이러한 제어 방법을 논문에 적용할 경우, 시스템이 실제로 원하는 무게값을 정확하게 유지할 수 있는 능력을 강조하게 됩니다. 압력 제어의 비선형성에 대한 보정을 통해 무게의 정확한 제어가 가능하게 되며, $k_{ff} \cdot (Load\ Setting)$ 을 통해 보정하는 방식이다.

부하 제어 알고리즘은 Fig. 18에 설명된 것처럼 비상 버튼 상태를 지속해서 확인함으로써 제어 루프에서 최우선으로 안전 상태를 보장하는 방식이다. 이 비상 버튼을 누르면 제어 보드는 실행 중인 모든 작업을 중지하고 전기 모터를 정지해 솔레노이드 밸브를 열어 유압 액추에이터 압력을 몇 초 만에 0으로 감소시킨다. 실행 모드가 활성화된 경우, 제어 루프는 다음과 같이 작동한다. 먼저, 제어 보드는 압력센서와 설정

다이얼의 신호를 입력받는다. 설정 다이얼에서 나오는 신호는 ADC 값과 원하는 부하 범위(0~130kg까지) 간의 관계를 맵핑하여 원하는 부하로 처리하도록 변환한다. 이후, 압력센서로부터 얻은 데이터를 시반으로 실제 부하가 로드셀을 사용하여 계산된다. 그다음으로 압력센서 기준 실제 부하와 포텐서미터 기준 원하는 부하를 정확히 정의한다. 전기 모터- 펌프 시스템은 시스템 압력만을 증가시킬 수 있으며, 시스템 압력을 감소시키기 위해서는 솔레노이드 밸브를 사용해야 한다. 따라서, 실제 부하가 원하는 부하보다 작을 경우, PID 제어 알고리즘 적용하여 실제 부하가 원하는 부하를 근접하게 따라갈 수 있도록 제어한다. 실제 부하가 원하는 부하보다 큰 경우(운동 중이거나 원하는 부하가 변경되는 경우), 솔레노이드 밸브가 열리고 액추에이터에서 탱크로 오일이 이동 가능하며, 결과적으로 실 부하는 감소할 수 있다.

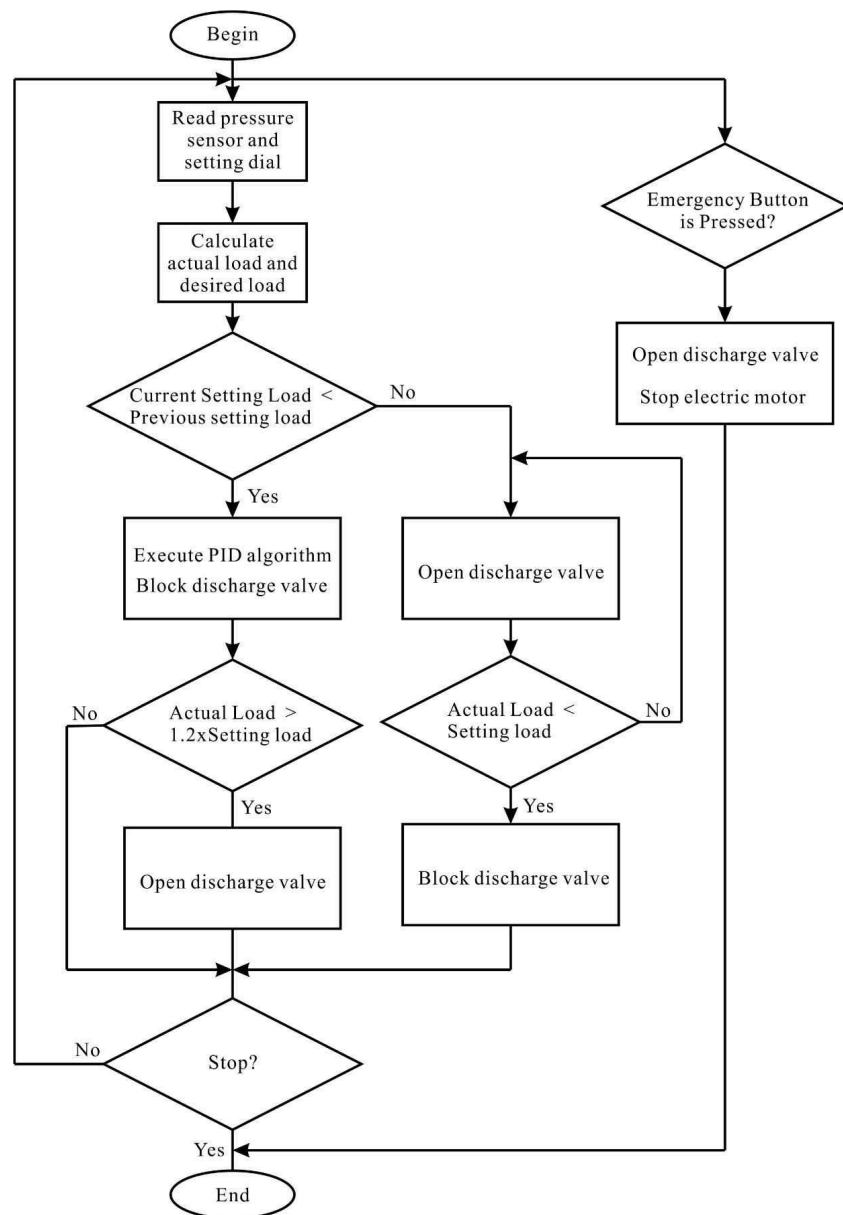


Fig. 18 Load control algorithm

3.2.2 디스플레이 시스템 제어 알고리즘

디스플레이 시스템의 제어 순서도는 Fig. 19과 같이 나타난다. 디스플레이 시스템의 주요 기능은 LED7SEG 모듈에서 숫자로 표현되고 LED 패널에서 LED가 켜지는 횟수를 보여주며 동시에 원하는 설정 부하를 표시한다. 또한, LED 패널에는 사용자의 운동 상태에 따라 상하 이동 및 이동 속도를 화면에 표시한다. 이를 위해서, 사람의 움직임에 따른 증분 인코더의 정보와 원하는 부하를 맞추는 설정 다이얼의 신호를 제공해야 한다.

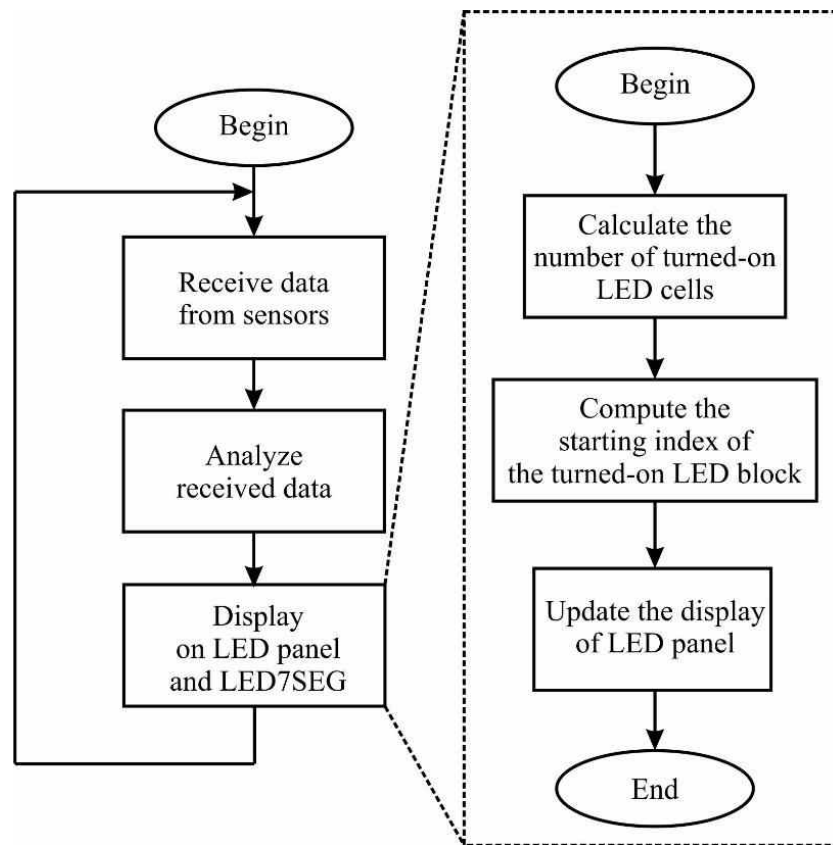


Fig. 19 Display control algorithm

디스플레이 시스템을 제어하기 위한 절차는 다음과 같이 진행된다. 먼저, 설정 다이얼 및 인코더에서 나온 데이터는 디스플레이 제어 보드에 의해 수집된다. 이에 따라 원하는 로드와 핸들의 위치를 정확하게 계산할 수 있다. LED 패널은 일련의 단일 LED로 구성되며, LED 드라이버 (WS2812B)를 사용하여 하나의 데이터 핀으로 각 LED를 프로그래밍해 제어할 수 있다. 이때, 단일 LED의 수는 원하는 로드와 핸들에 따라 계산된다. 예를 들어, 30개의 단일 LED가 있고 최대 로드가 130kg이라면, 로드 수준을 표시하기 위해 13개의 단일 LED를 사용할 수 있다. 나머지 17개의 LED는 사람의 동작을 표시하는 데 사용된다. 즉, 로드 10kg당 1개의 LED에 해당하는 LED 패널이 켜지는 방식으로 작동한다.

3.3 기계 설계

3.3.1 유압 파워팩 설계

상기 개발한 전기유압식 운동 기구의 무게 장치부는 유압 파워팩의 사양에 따라 최대/최소 무게 설정이 가능하다. 초기 목표로 설정된 무게 범위는 최소 20kg에서 최대 130kg까지이며, 이는 사용자의 다양한 운동 수요에 대응하기 위한 범위로 조절하였다. 이러한 범위 내에서 무게 설정을 편리하게 조절하기 위해, 무게 설정 해상도는 1kg씩 변경할 수 있도록 세심하게 설계되었다.

이 유압 파워팩의 매개 변수는 Table.5에서 상세히 제시되고, 이 표를 통해 운동 기구의 무게 설정이 어떻게 제어되고 있는지에 대한 정보를 확인할 수 있다. 3D 모델링을 통해 시각적으로 확인할 수 있는 유압 파워팩의 실제 형태는 Fig. 20에서 나타난다. 또한, 2D 디자인은 Fig. 21에서 확인할 수 있으며, 이를 통해 유압 파워팩의 구조와 배치에 대한 상세한 내용을 파악할 수 있다. 이렇게 시각적인 자료를 통해 유압 팩에 대한 설명을 논문에 더욱 구체적으로 표현할 수 있다.

Table 5 Parameters of hydraulic powerpack

Specifications	Value
Dimension	500 x 280 x 420 (mm)
Min and Max. load	Min. 20kg, Max. 130kg
Drum diameter	40 mm

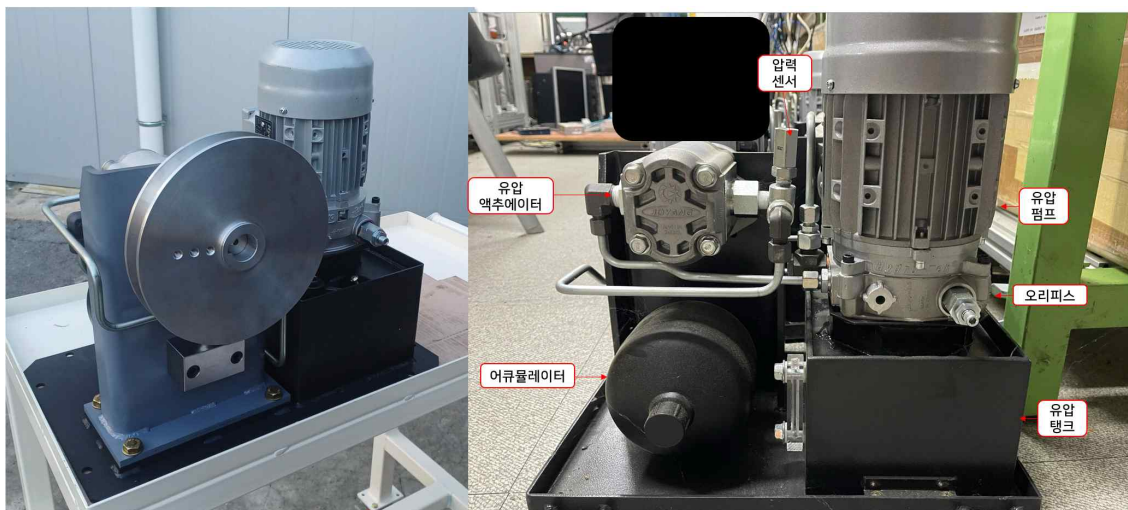


Fig. 20 The real hydraulic powepack

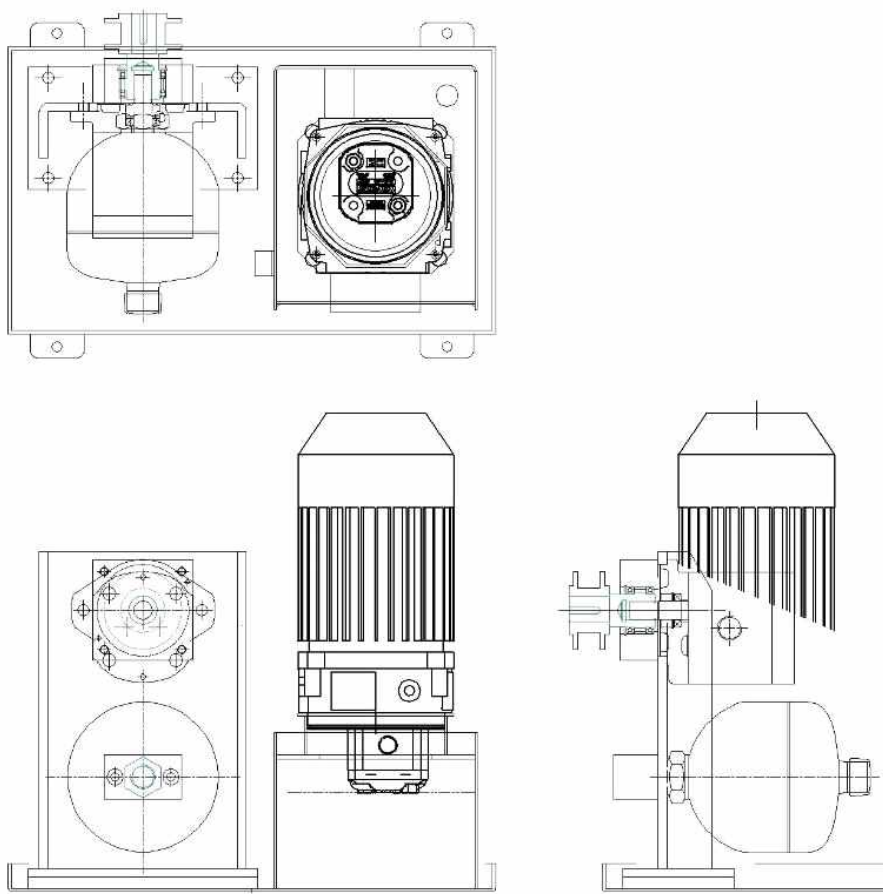


Fig. 21 The 2D drawing of hydraulic powerpack design

3.3.2 렛 풀 다운 기구 프레임 설계

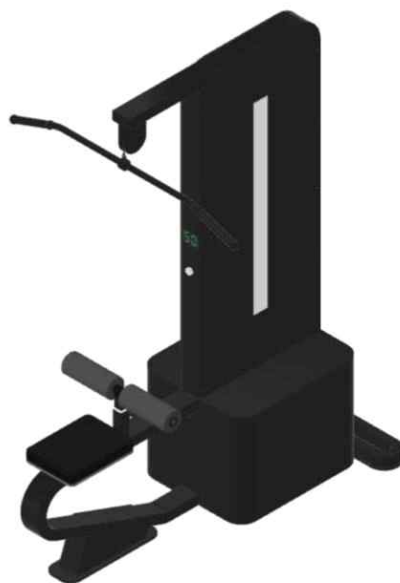




Fig. 22 The 3-D design of Lat Pull Down Machine

Table 6 Technical parameters of lat pull down machine


Frame	Technical requirements
	<ul style="list-style-type: none"> - Designed based on hydraulic power unit size. - Dimensions: 1576 x 800 x 2010 mm - There are ventilation holes and cooling fans. - The frame is mounted from rectangular iron with dimensions of 100 x 50 and 50 x 50 mm. - The pulley mounting positions must be fixed in a suitable position to connect the conductor. - Weight display and weight adjustment knob are attached on the front of the frame.
<p>Seat and Shell Cover</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> - The shell is attached to an LED bar. - The seat position and footrest are properly placed in the frame.



3.3.3 체스트 프레스 기구 설계



Fig. 23 The 3D Design of the Chess Press Machine

Table 7 Technical parameters of chess press machine

Tower	Technical parameters
	<ul style="list-style-type: none"> - Designed based on hydraulic power unit size - Dimensions: 541 x 447 x 1500 mm - There are ventilation holes and cooling fans - The position of the two sides is attached with an LED bar and a weight display screen. - The adjustment knob is located on the side of the weight

	<p>display screen for easy adjustment.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Built-in control circuit inside the tower
Frame	Technical parameters
	<ul style="list-style-type: none"> - The structure is suitable to connect the parts. - Firm and good bearing with the load of the practitioner and the load when operating. - Dimensions: 841.5 x 1070.44 x 1290.15 mm - Backrest angle: 70° from horizontal - The seat must be adjustable. - The backrest must be wide enough for the user to feel comfortable. - Suitable and aesthetically pleasing design. - Must have shock absorbers for the arm. - The pulley mounting positions must be fixed in a suitable position to connect the conductor.
Work-arm	Technical parameters
	<ul style="list-style-type: none"> - Arm tilt angle: 70° from horizontal. - Two-arm width: 1000 mm. - Dimensions: 932.39 x 1000.13 x 1042.95 mm. - The position on both sides of the hand is designed to make it comfortable to hold. - It has a foam cover for a comfortable grip. - There is a foot position to create force when pushing and protect the practitioner when overloaded.

4. 실험

4.1 실험 결과

4.1.1 부하 센싱 캘리브레이션

본 실험을 통해 측정된 압력과 파워팩에 의해 생성된 실제 부하와의 관계를 판단하기 위해서는 캘리브레이션이 수행되어야 하며, 시스템 압력은 압력센서에 의해 직접 측정되고 실제 부하는 무게 측정 장치의 디스플레이에서 확인할 수 있다. 유압 압력 부하 센싱 캘리브레이션은 개발 시스템에서 압력 센서의 정확성을 보장하기 위한 과정이다. 이 캘리브레이션 프로세스는 측정 장비의 선택, 환경 조건 확인, 캘리브레이션 장비 연결, 영점(Zero Point) 캘리브레이션, 가능한 압력 포인트에서의 캘리브레이션, 선형 테스트, 결과 기록 및 문서화, 주기적인 재측정의 과정을 포함한다. 본 논문에서는 다양한 압력 레벨(15 ~ 119bar)에서 실제 부하 데이터 측정값을 측정하고 기록한다. 이를 토대로 센서의 출력을 정확한 압력 값으로 변환하는 적절한 보정 곡선을 생성하며, 캘리브레이션 결과를 기록하고 문서로 만들어 다음에 필요한 경우 참고할 수 있도록 Table 8과 같이 정리하였다. 이러한 유압 압력 부하 센싱 캘리브레이션은 정확한 측정 결과를 제공하고 시스템 성능을 최적화하는 데 중요하다.

Table 8 Pressure and Actual Load Data for Calibration

No.	Pressure (bar)	Actual Load (kg)
1	118.99	142.5
2	106.17	125.1
3	104.58	123.4
4	99.33	115.1
5	91.2	100.4
6	81.44	89.2
7	77.05	81.4
8	70.7	74.7
9	64.22	68.3
10	59.46	63.3
11	46.83	50.4
12	40.23	44.2
13	30.22	34.5
14	21.86	28.2
15	15.63	16.1

압력과 실제 부하와의 관계를 설명하는 다항식을 찾기 위해 MATLAB/Simulink를 사용하여 “polyfit”함수를 적용하였다. 이 경우, 삼차함수를 사용하고 그 계수는 다음과 같다 (Fig. 24 참고).

$$k_1 = 3.2175e-5; k_2 = -0.0028; k_3 = 1.0720; k_4 = 2.8759.$$

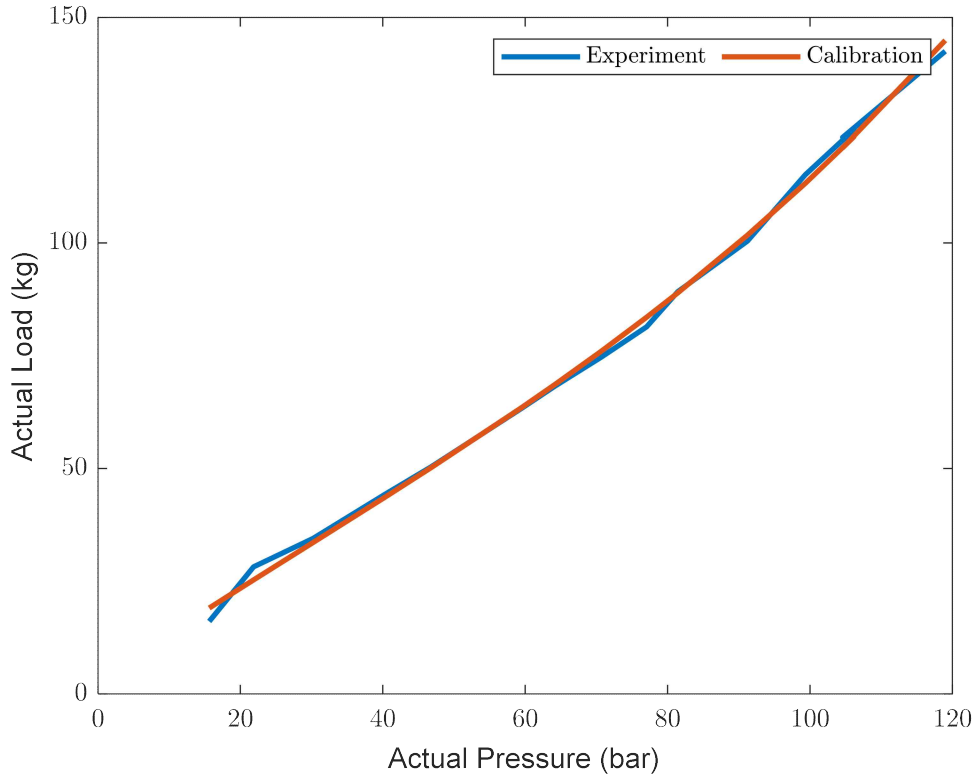


Fig. 24 Validation of Calibration process

4.1.2 부하 설정 캘리브레이션

부하 설정 캘리브레이션은 아날로그 디지털 변환기(ADC)값을 실제 부하 값을 맵핑하는 프로세스이다. 먼저 측정 장비나 부하 셀 선택은 정확한 부하 값을 측정하기 위해 적절한 장비와 부하 셀을 선택한다. ADC 읽기 및 실제 부하 측정은 특정 부하에 대해 ADC 값을 읽고 동시에 해당 부하를 측정하는 방식이다. 이때, 초기 캘리브레이션 포인트 수집은 여러 부하 레벨에서 ADC 값을 기록하고 이를 각 부하 값에 매핑한다. 이로써 초기 캘리브레이션 포인트를 수집할 수 있다. 다음으로, 캘리브레이션 곡선 생성을 진행한다. 이는 수집한 데이터를 기반으로 ADC 값과 실제 부하 값 간의 관계를 설명하는 캘리브레이션 곡선을 생성한다. 대체로, 선형 곡선이 나타나, 때에 따라 비선형일 수 있다. 추가 포인트 측정은 필요에 따라 다양한 부하 레벨에서 추가 ADC 값을 측정하고, 곡선이 정확히 부하 값을 반영하도록 보정 작업을 수행한다. 이후, 캘리브레이션 결과를 기록하고 주기적인 재측정을 통해 환경이나 장비의 변화로 인해 발생하는 변수에 대비하여 정기적으로 캘리브레이션을 수행하여 정확성을 유지할 수 있다. 이렇게 하면 시스템이 ADC 값을 올바른 부하 값으로 해석하고, 사용자는 정확한 부하 값을 얻을 수 있다.

설정 부하를 동기화하기 위해서 LED 7 세그먼트 모듈에 표시된 설정 부하와 제어 모듈에 공급되는 설정 부하 캘리브레이션 작업을 수행해야 한다. 디스플레이 제어 보드의 ADC 값과 제어 보드의 캘리브레이션 된 설정 부하를 판독한 후 다항식을 이용하여 이들 관계를 구해야 한다. 이 캘리브레이션을 위해 MATLAB을 사용한 소스 코드는 다음과 같다.

```

Setting_Load = [0.07;0.37;1.04;1.72;2.16;2.54;3.81;8.13;12.76;17.84;22.09
;...
27.31;32.24;37.09;40.22;43.28;48.66;48.88;53.21;58.43;64.10;68.88;72.4
6;...
75.15;78.88;82.31;87.09;90.90;94.18;97.16;103.66;106.12;107.61;109.63
;...
111.04;113.88;116.57;118.43;120.07;121.94;124.18;125.52;127.91;129.40;1
30.00];

ADC_Uno = [75;76;80;88;92;101;131;163;199;229;266;302;336;355;377;401;...
412;442;479;519;551;576;594;617;642;676;705;726;750;767;797;817;828;84
4;...
857;879;898;915;929;946;967;981;1003;1018;1022];

f = polyfit(ADC_Uno,Setting_Load,3);
Calib_Load = f(1)*ADC_Uno.^3 + f(2)*ADC_Uno.^2 + f(3)*ADC_Uno + f(4);

plot(ADC_Uno,Setting_Load,ADC_Uno,Calib_Load,'LineWidth',2.0);
xlabel('ADC Value');
ylabel('Setting Load (kg)');
legend('Experiment','Calibration','Orientation','Horizontal');

```

다항식의 계수는 $k_1 = -7.4355e-8$; $k_2 = 1.2360e-4$; $k_3 = 0.0862$; $k_4 = -7.3608$ 이다. 그 결과는 Fig. 25과 같이 나타난다.

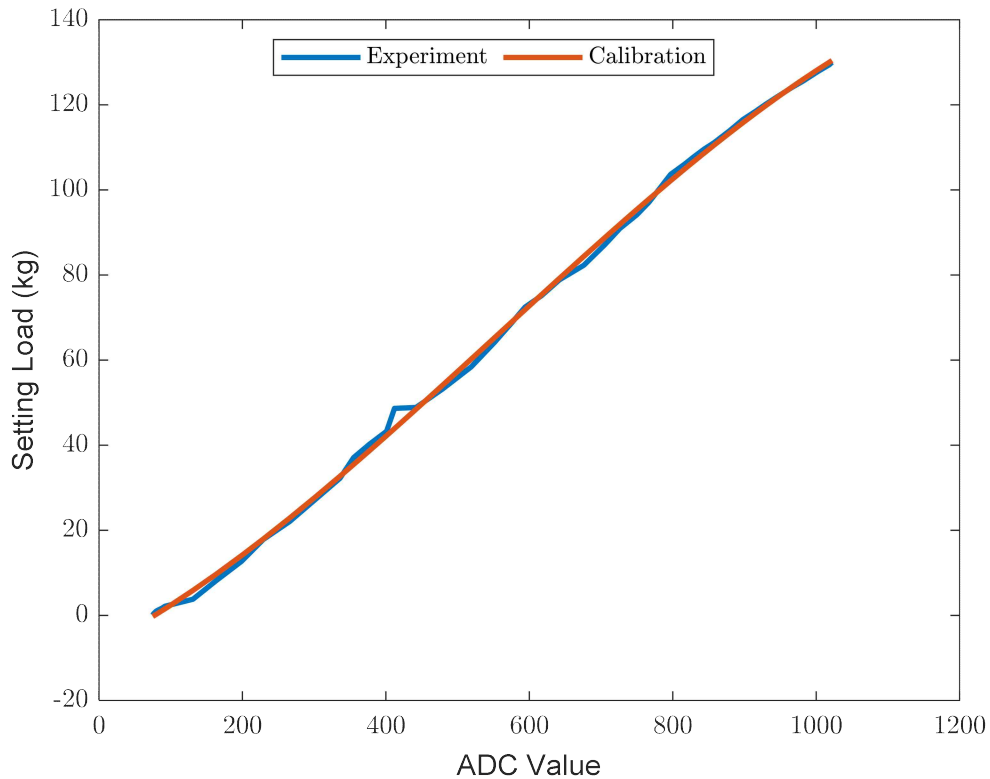


Fig. 25 Load Setting Calibration Result

부하 설정 캘리브레이션을 위한 구성품은 다음과 같다.

- Weight plates (5kg, 10kg, 20kg)
- Load cell YC60-500K
- Indicator: YD3533
- DAQ terminal SCB-68A
- PCI NI 6221

이 절차를 정리하면 다음과 같다.

Step 1: 다양한 부하 조건을 설정하고 실시간 데스크톱 Simulink에서 결과를 불러온다.

Step 2: 다항식 근사를 적용하여 실제 부하 값과 ADC 값 사이의 선형 관계를 구성한다.

Step 3: ADC 값을 실제 부하 값으로 다시 변환하는 기능을 설정한다.

Step 4: 다른 부하 조건이 적용되면 인디케이터와 PCI 모두의 디스플레이 값을 비교한다.

이러한 절차를 거쳐 캘리브레이션 결과는 다음 Fig. 26와 같이 나타난다.

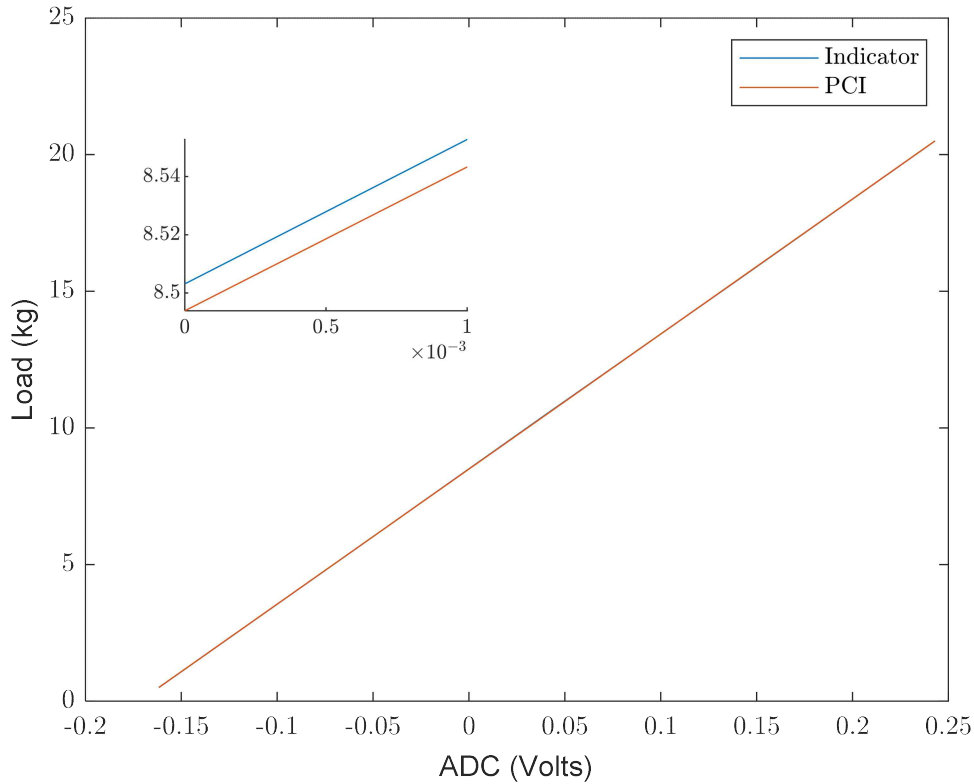


Fig. 26 Loadcell Indicator Calibration Result

4.2 부하 조절 성능

4.2.1 정확도 평가

전기 유압 운동 기구의 정확도 평가는 일반적으로 디지털 운동 기구가 사용자에게 제공하는 무게감의 정밀도와 일관성을 측정하기 위해 수행된다. 이 과정에서 무게 설정의 정확성, 응답 시간, 부드러운 운동 전환, 내구성 및 신뢰성, 사용자 피드백과 같은 요소들이 중요하게 고려된다. 본 논문에서는 사용자의 운동 효과 및 안전성에 직접적으로 영향을 미치므로 개발 디지털 기구의 무게 설정의 정확성을 주로 다룬다.

전기 유압 운동 기구의 무게 설정 정확도를 향상시키기를 위한 연구와 개발은 앞서 3장의 3.1 주 제어 보드에서 3.2 제어 알고리즘까지 각종 센서 기술, 알고리즘 최적화, 데이터 피드백 등의 개선을 하였다. 본 연구는 이러한 기술적 진보가 어떻게 전기 유압 운동 기구의 무게 설정 정확도를 향상하며, 최종적으로 사용자의 운동 효과와 안전성을 증진하는지에 대해 심도 있게 탐구하고자 한다.

조절 성능 평가하기 위해 각각 50kg, 100kg 무게 설정 테스트 2개의 사례 연구(a-b)가 수행되었으며, 각 사례 연구는 총 5회 실시하여 Fig. 27-28와 같은 결과를 다음과 같이 확인하였다.

a) 사례 1: 50Kg 부하 설정

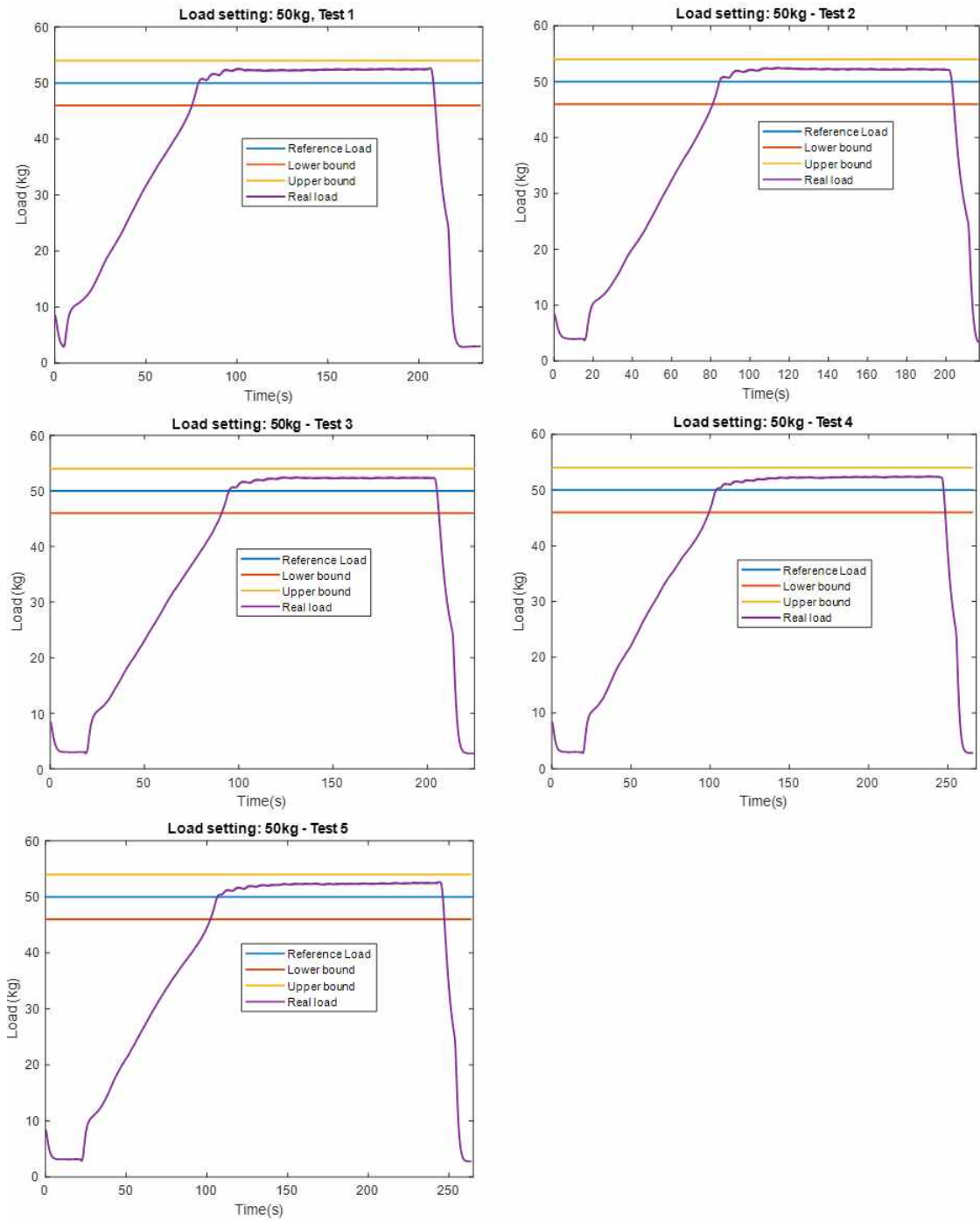


Fig. 27 Load setting 50kg test results

b) 사례 2: 100Kg 부하 설정

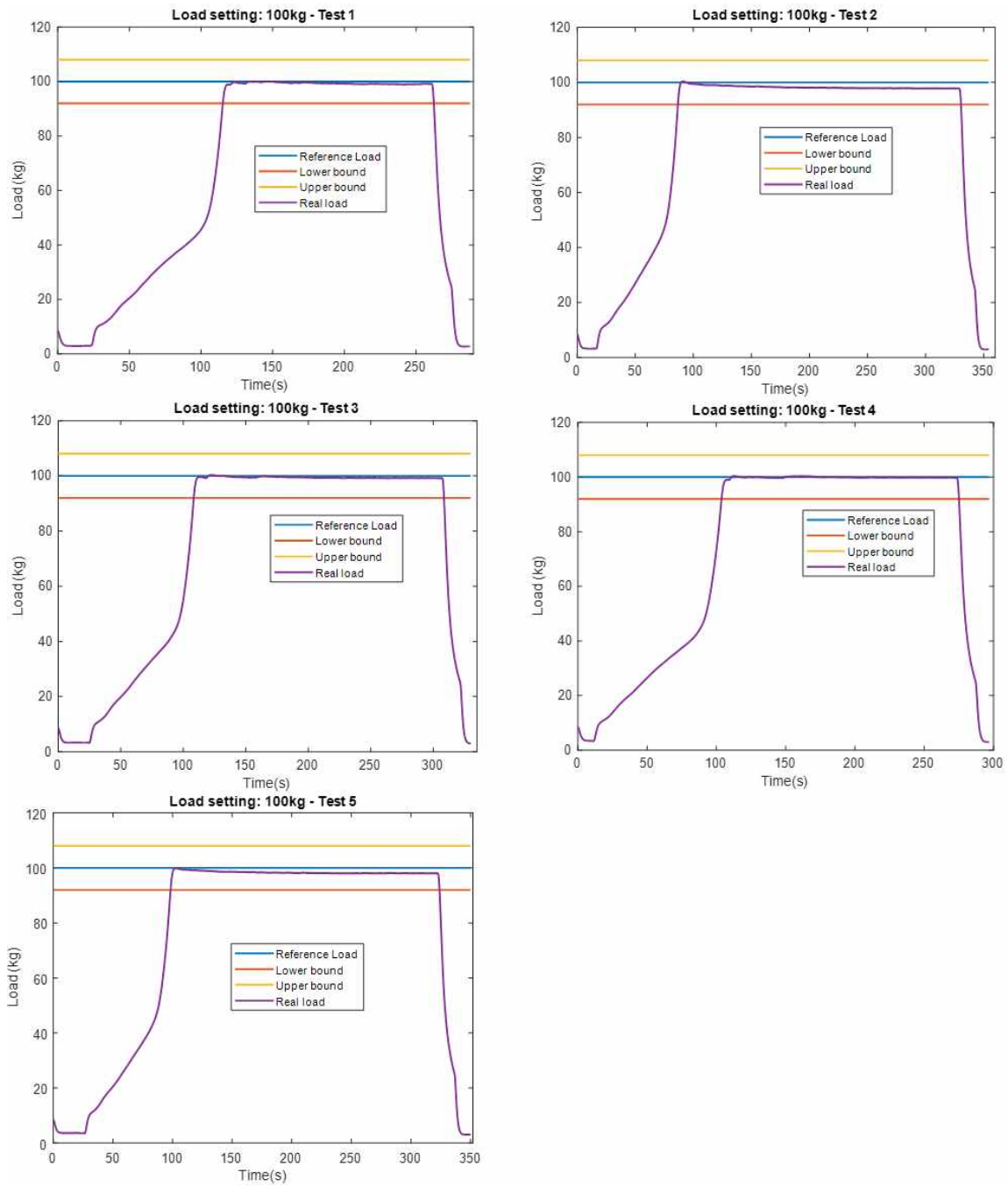


Fig. 28 Load setting 100kg test results

부하 설정 테스트 결과는 50Kg, 100Kg 각각 Table 9에 결과를 정리하였다.

Table 9 Test results with 5 test cases

Load setting	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
50 (kg)	52.5	52.3	52.4	52.4	52.5
100 (kg)	99.1	97.9	99.3	99.9	98.1

4.2.2 최대 부하 평가

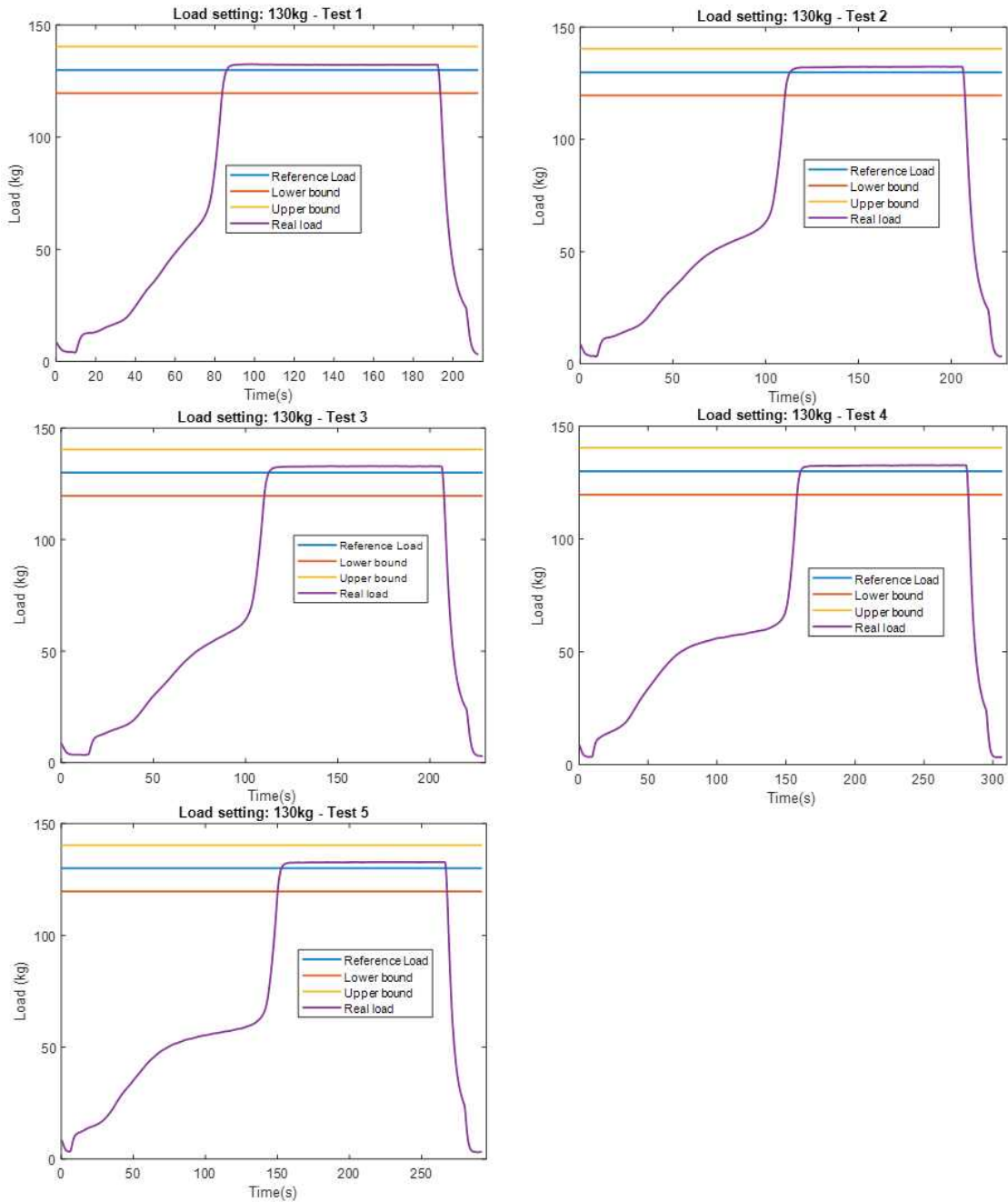


Fig. 29 Maximum Load setting 130kg test results

최대 부하 테스트 결과는 130Kg 설정값으로 Fig. 29과 같이 총 5회 반복 시험하여 Table 10에 결과를 정리하였다.

Table 10 Maximum Load Test

Load setting	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
130 (kg)	132.3	132.4	132.9	132.7	132.8

4.2.3 LED 속도 테스트

LED 속도 테스트의 요약된 결과는 Table. 11에 제시되어 있으며, 본 실험은 Fig. 29과 같이 실제 연구원의 시연 테스트를 바탕으로 진행되었다.

Table 11 LED Speed Test Results

Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
0.62m/s	0.96m/s	0.61m/s	0.87m/s	0.93m/s



Fig. 30 Real user demonstration for LED Speed Test Results

5. 결론

기존 중량원판을 대체한 디지털 웨이트 머신을 설계된 능동형 전기 유압 파워팩, 프로그래밍 제어 보드, LED 패널 탑재하여 정밀하고 안전한 무게 효과인 대표적인 근력 운동 기구인 체스트 프레스, 랫 폴 다운 운동 기구 설계하였다. 본 논문의 주요 목표는 최적 유압 시스템 구성을 위해 최소/최대 무게 20kg/130kg, 설정 무게 제어 정밀도 92%, 제어 해상도 오차 최대 1kg, 사용자 운동 시 반응형 LED 패널을 대표 설계 운동 기구 2종 기계에 적용하여 검증 및 평가 수행하였다. 즉, 이 논문은 전기 유압 모듈 시스템의 힘 제어 성능 및 안정성 테스트를 수행하여 새로운 종류의 디지털 근력 운동 기구를 제시한다. 개발 전기 유압 파워팩 무게 제어 성능을 관리한다. 이 디지털 운동 기구는 메인 제어보드, 제어 보드(Control Processing Unit, Amplifier Block, Communication Circuit, Relay Module, Power Supply, Expander Module), PCB, 제어 보드 디스플레이, 유압 파워팩을 설계하고, 체스트 프레스와 랫 폴 다운 2종 프레임 설계/제작하였다.

이 유압 시스템은 3상 AC 모터, 유압 펌프, 솔레노이드 밸브, 어큐뮬레이터 등으로 구성된다. 어큐뮬레이터를 활용하여 유압 오일의 효율적인 이용을 추구하며, 가변 오리피스와 솔레노이드 밸브를 통해 시스템 압력을 제어한다. 전동 모터의 속도를 조절하여 유압 펌프의 유량을 변화시키고, 압력센서와 증분 엔코더로 시스템 상태를 모니터링한다.

유압 힘 제어 시스템은 FF-PID 제어를 도입하여 압력을 비선형 시스템에서 정확하게 제어하고 사용자의 불확실성에 대응한다. 이 FF-PID는 피드백 외에도 추가 정보를 활용하여 초기에 사용자가 설정한 무게를 정확하게 유지하고 압력 제어의 비선형성을 보정하는 방식이다. 부하 제어 알고리즘은 비상 버튼을 감지하여 안전 상태를 유지하며, 실행 모드에서는 압력 센서와 설정 다이얼을 활용하여 부하를 계산하고 PID 제어를 통해 부하를 근접하게 유지한다. 이를 통해 본 논문은 안전한 제어와 부하 균형을 FF-PID 제어를 바탕으로 강조한다.

설정 부하를 동기화하기 위해 설정 부하 캘리브레이션 작업을 수행하였다. MATLAB/Simulink를 이용하여 다양한 부하 조건을 설정하여 실시간으로 Simulink에 결과를 불러온다. 이때 다항식 근사를 적용하여 실제 부하 값과 ADC 값 사이의 선형 관계를 구성하고 ADC 값을 실제 부하값으로 변환하는 과정을 반복한다. 이를 통해 다른 부하 조건이 적용되면 인디케이터와 PCI 모두의 값 비교를 통해 해당 무게를 설정할 수 있게 조정하였다.

실제 개발 운동 기구를 통한 정확도 평가(50kg/100kg)는 총 5회 반복 시험 시행하였다. 부하 설정 테스트 결과 50kg, 100kg 각각 설정 무게와 실제 무게 평균 차이는 2.4kg, 1.1kg의 정확도를 보였다. 또한, 최대 부하 테스트 결과는 130Kg 설정값으로 5회 반복 시험하여 설정 무게와 실제 무게 평균 차이 2.6kg의 정확도를 확인하였다. LED 속도 테스트는 실제 연구원의 시연을 통해 5회 수행하여 평균 0.8m/s의 속도를

나타내었다.

향후 사용자가 개발 운동 기구를 통해 운동하면 운동 정보(횟수,무게)를 바탕으로 사용자의 움직임, 신체 상태, 심박수, 칼로리 소모량 등을 측정 후 환산하여 앱을 통해 건강 관리를 할 수 있는 시스템 구축이 가능하다. 더불어, 단순 근력 운동 기구의 전자화뿐만 아니라 이 운동 정보의 빅데이터화로 AI, 인공지능, XR 등의 기술을 접목하여 다양한 콘텐츠로 확장한다면 본 연구를 통해 산업계에서 디지털 헬스케어 및 게이미피케이션 등의 플랫폼화가 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1]Peate W.F., Bates G., Lunda K., Francis S., Bellamy K. Core strength: A new model for injury prediction and prevention. *J. Occup. Med. Toxicol.*, 2:3, 2007.
- [2] Yu H., Hu J., Liu G. Safety analysis and research on public outdoor fitness equipment. *Contemp. Sports Sci. Technol.*, 10, 206-209, 2020.
- [3] Lee, SungChul; Islam, Mohammad M; Rogers, Michael E; Kusunoki, Masanobu; Okada, Akiyoshi; Takeshima, Nobuo, "Effects of Hydraulic-Resistance Exercise on Strength and Power in Untrained Healthy Older Adults", *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(4), 1089-1097, 2011.
- [4] Keri L. Strand, Lucrezia Lucchi, Tamara González Copo, Nicholas P. Cherup, Joseph F. Signorile, "Optimal loads for power in older men and women using plate-loaded resistance machines", *Experimental Gerontology* 124, 2019
- [5] Yu W., Wang L., Wang X., Niu Y., Chen M., Xue W., Wei J. Structural design and finite element analysis of home-type multifunctional treadmills. *Mech. Des.*, 37, 140-144, 2020.
- [6] N. I. Kim, Y.I.Kim, K. S. Choi, C. K. Kim, "Exercise Physiology: The Effects of Aerobic and Resistance Exercise Programs on Cardiovascular Health and Muscular Strength in Elderly Women", *Korean Journal of Sport Science*, 40(2), 547-557, 2001.
- [7]Y. S. Kang, S. B. Seo, H. H. Lee, M. Yu, C. U. Hong, and T. K. Kwon, "Analysis on Effect on Body Strength of Smart Exercise System for the Elderly", *Proceedings of the Korean Society of Rehabilitation Welfare Engineering Conference*, pp. 196-198, 2022.
- [8]H. J. Woo, M. Yu, C. U. Hong, and T. K. Kwon, "Analysis of Muscle Strength Effects on Exercise Performance using Dynamic Stabilization Exercise Device", *Proceedings of the Korean Society of Rehabilitation Welfare Engineering Conference*, pp. 9-10, 2021.
- [9] Ohman, A., "Qualitative methodology for rehabilitation research. *Journal of rehabilitation*

tion medicine”, 37(5), pp.273-280, 2005.

[10] Tonal, <https://www.tonal.com/>

[11] Speediance, <https://www.speediance.com/>

[12] Gymera, <https://en.gymeratech.com/>

[13] Newtonz, <https://www.newtonz.co.kr/>

[14] Abdulkarem, Mohammed, Khairulmizam Samsudin, Fakhrol Zaman Rokhani, and Mohd Fadlee A Rasid. "Wireless sensor network for structural health monitoring: A contemporary review of technologies, challenges, and future direction." *Structural Health Monitoring* 19, no. 3, 693-735, 2020.

[15] Hao, Yang, and Robert Foster. "Wireless body sensor networks for health-monitoring applications." *Physiological measurement* 29, no. 11, R27, 2008.

[16]Evangeline, C.S. and Lenin, A., "Human health monitoring using wearable sensor", *Sensor Review*, Vol. 39 No. 3, pp. 364-376, 2019.

[17]Doherty, Sean T., and Paul Oh. "A multi-sensor monitoring system of human physiology and daily activities." *Telemedicine and e-Health* 18, no. 3, 185-192, 2012.

[18] Anikwe, Chioma Virginia, Henry Friday Nweke, Anayo Chukwu Ikegwu, Chukwunonso Adolphus Egwuonwu, Fergus Uchenna Onu, Uzoma Rita Alo, and Ying Wah Teh. "Mobile and wearable sensors for data-driven health monitoring system: State-of-the-art and future prospect." *Expert Systems with Applications* 202, 2022.

[19] Novatchkov H, Baca A. "Artificial intelligence in sports on the example of weight training." *J Sports Sci Med.*, 12(1), 27-37, 2013.

[20] Qian J, McDonough DJ, Gao Z. The Effectiveness of Virtual Reality Exercise on Individual's Physiological, Psychological and Rehabilitative Outcomes: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. ,17(11), 2020.

[21] Lee, H.T., Kim, Y.S. The effect of sports VR training for improving human body composition. *J Image Video Proc.*, 148, 2018.

[22] Wu, Yu-Chi, Shi-Xin Lin, Jing-Yuan Lin, Chin-Chuan Han, Chao-Shu Chang, and Jun-Xian Jiang., "Development of AI Algorithm for Weight Training Using Inertial Measurement Units" *Applied Sciences* 12, no. 3: 1422, 2022

[23] Dennis L. Kappen, Pejman Mirza-Babaei, Lennart E. Nacke, "Technology Facilitates Physical Activity Through Gamification: A Thematic Analysis of an 8-Week Study", *Front. Comput. Sci.*, 2, 2022

[24] Guo Y-Q, Zha X-M, Shen Y-Y, Wang Y-N, Chen G. Research on PID Position C

ontrol of a Hydraulic Servo System Based on Kalman Genetic Optimization. *Actuators*. 2022; 11(6):162

[25] Rui Liu, Andrew Alleyne, "Nonlinear force/pressure tracking of an electro-hydraulic actuator." In: *IFAC Proceedings Volumes*, 32(2), pp. 952-957, 1999

[26] Alleyne, Andrew, Rui Liu, and Heather Wright. "On the limitations of force tracking control for hydraulic active suspensions." In *Proceedings of the 1998 American Control Conference*. ACC (IEEE Cat. No. 98CH36207), vol. 1, pp. 43-47. IEEE, 1998.

[27] Guo, J., Zhou, J., & Cui, T. The application of the hybrid fuzzy control of the furnace. *The Information of microcomputer*, 21, 106-109, 2004.

[28] Kha NB, Ahn KK. Position control of shape memory alloy actuators by using self tuning fuzzy PID controller. In: *Proceedings of IEEE international conference on industrial electronics and applications*, p. 1-5, 2006

[29] Ahmed R, Abdul O, Marcel C. dSPACE DSP-based rapid prototyping of fuzzy PID controls for high performance brushless servo drives. In: *Proceedings of IEEE international conference*, p. 1360-4, 2006.

[30] Truong DQ, Ahn KK, Soo KJ, Soo YH. Application of fuzzy-PID controller in hydraulic load simulator. In: *Proceedings of the IEEE international conference on mechatronics and automation*; 2007. p. 3338-43

[31] Wang J, An D, Lou C. Application of fuzzy-PID controller in heating ventilating and air-conditioning system. In: *Proceedings of the IEEE international conference on mechatronics and automation*; 2006. p. 2217-22.

[32] Soyguder S, Karakose M. Design and simulation of self-tuning PID-type fuzzy adaptive control for an expert HVAC system. *J Mechatron Expert Syst Appl*; 2008.

[33] Hung, L. C., Lin, H. P., & Chung, H. Y., Design of self-tuning fuzzy sliding mode control for TORA system. *Expert Systems with Applications*, 32(1), 201-212, 2007.

[34] Santosh Kr. Mishra, Gyan Wratt, Prabhat Ranjan & J. Das, "PID controller with feed forward estimation used for fault tolerant control of hydraulic system", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32 (8), 3849~3855, 2018

Developing Next-Generation Workout Machine with Electro-Hydraulic System

JeeHwan Ahn

School of Mechanical Engineering,
University of Ulsan, South Korea

ABSTRACT

This paper addresses various strength training equipment and operating algorithms to address safety and convenience issues when exercising at home, a concern that has risen significantly due to heightened interest in health following the COVID-19 pandemic. In order to overcome safety and convenience issues associated with traditional weight plate-based equipment, the paper partially adopts a weight implementation method using hydraulic dampers and pneumatic systems. However, this method, while providing safety and a variety of exercise options, has limitations as users cannot adjust exercise intensity to perform consistent strength training. In particular, the hydraulic damper/pneumatic method has disadvantages such as being costly, having high maintenance costs, and occupying a significant amount of space. As an alternative solution, a digital exercise equipment called 'Digital Weight Machine (DWM)' has been developed, which includes electric motor-type weight machines and electric hydraulic-type weight machines. This study compares these two technologies, with a focus on electric hydraulic exercise equipment.

Electric motor-type weight machines enable strength training using an electric motor, allowing users to control exercises through a computerized control system. On the other hand, electric hydraulic exercise equipment allows easy adjustment of the weight required for significant power, providing a smooth and precise weight feel through hydraulic actuators. This research compares the strengths and weaknesses of these two technologies, introduces the developed electric hydraulic exercise equipment frame and controller, and presents test results for 50 kg and 100 kg weights. In conclusion, this study discusses sensors and hydraulic actuators for the advancement of digital exercise equipment and proposes the development of control algorithms.