

# 디지털 케이블 운동기구에서 가속도 기반 동적 부하 제어 알고리즘

(Acceleration-Based Dynamic Load Control Algorithm for Digital Cable Exercise Equipment)

윤준혁\*, 남동현\*\*, 고일주\*\*\*

(Junhyeok Yun, Donghyun Nam, Ilju Ko)

## 요약

본 연구는 디지털 케이블 운동기구에서 사용자의 가속도 변화를 실시간 제어 입력으로 활용하여 동적 부하를 생성하는 가속도 기반 동적 부하 제어 알고리즘을 제안한다. 전통적 기계식 케이블 운동기구에서 나타나는 관성, 감쇠, 마찰 성분을 포함한 동적 부하 모델을 참조 부하로 정의하고, 참조 부하와 측정 부하 간 오차를 누적 갱신하는 위상 적응형 피드백 구조를 설계하였다. 또한 등척성 구간에는 Deadband를 적용하여 출력 안정성을 확보하였다. 실험 결과, 제안 방식은 모델 타당성과 동적 구간 추종 성능을 확보하였으며, 구조적 지연 특성을 정량적으로 분석하고 보정 가능성을 확인하였다.

■ 중심어 : 디지털 케이블 운동기구 ; 동적 부하 제어 ; 피드백 제어 ; 가속도 기반 모델 ; 참조 부하

## Abstract

This study proposes an acceleration-based dynamic load control algorithm for digital cable exercise equipment, in which users' acceleration is utilized as a real-time control input to generate dynamic resistance. A dynamic load model incorporating inertia, damping, and friction components observed in traditional mechanical cable machines is defined as a reference load, and a phase-adaptive feedback structure is designed to iteratively update load commands based on the error between the reference and measured loads. A deadband mechanism is applied in the isometric phase to enhance output stability. Experimental results verify the model validity and dynamic load tracking performance of the proposed method, while quantitatively identifying structural response delays and confirming the feasibility of delay compensation.

■ keywords : Digital Cable Machine ; Dynamic Load Control ; Feedback Control ; Acceleration-Based Model ; Reference Load

## I. 서론

최근 생활체육 분야에서 디지털 운동 측정 및 처방에 관한 관심이 증가함에 따라, 전통적인 무게 플레이트 기반 저항성 운동기구를 디지털화된 모터 기반 운동기구로 대체하려는 시도가 이뤄지고 있다. 특히 디지털 케이블 운동기구는 무게 플레이트를 대체한 운동기구를 넘어 엔코더와 로드셀을 통해 운동 상태를 계측하고, 소프트웨어 알고리즘으로 저항을 생성하는 지능형 시스템으로 발전하고 있다. 그러나 상용화된 대부

분의 시스템은 전 구간 동일 부하를 유지하거나 사전에 정의된 시간 기반 저항 패턴을 출력하고 사용자가 이를 따라 수행하는 구조를 가져 진정한 의미의 지능형 운동 시스템으로 보기 어렵다.

이러한 디지털 제어 방식에서는 사용자의 실시간 운동 수행 상태, 특히 가속·감속 및 운동 위상 변화가 제어 입력으로 활용되지 못한다. 반면 전통적 기계식 케이블 운동기구에서는 설정 중량이 일정하더라도 가속도 변화에 따른 관성 성분이 형성되어 운동 과정에서 동적 부하 특성이 나타난다. 즉, 실제 체감 부하는 운동 속도와 가속

\* 정회원, 숭실대학교 미디어학과

\*\* 정회원, 숭실대학교 메타버스·문화콘텐츠학과

\*\*\* 정회원, 숭실대학교 글로벌미디어학과

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성(가상융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음 (IIIITP-2026-RS-2024-00430997)

접수일자 : 2026년 02월 24일

게재확정일 : 2026년 03월 05일

교신저자 : 고일주 e-mail : andy@ssu.ac.kr

도에 따라 동적으로 변화하는 특징을 가진다.

이에 본 연구는 가속도 기반 동적 부하 모델을 참조 부하로 정의하고, 이를 실시간 페루프 구조에 적용하는 동적 부하 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 구조는 케이블 가속도를 기반으로 참조 부하를 생성하고, 측정 부하와의 오차를 이산적으로 누적 갱신하는 피드백 제어 방식을 따른다. 또한 운동 위상을 입력 변수로 활용하여 구간별 제어 이득을 달리 적용함으로써 동적 구간에서는 추종 성능을, 등척성 구간에서는 안정성을 확보하는 위상 적응형 제어 구조를 구현한다.

본 연구는 가속도 기반 동적 부하 모델을 제어 참조 부하로 정의하고, 위상 적응형 누적 피드백 구조를 통해 페루프 환경에서의 구조적 추종 특성을 정량적으로 검증하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 디지털 케이블 운동기구를 정적 운동 부하 출력 장비에서 사용자 움직임에 적응하는 지능형 제어 시스템으로 확장하기 위한 소프트웨어 프레임워크를 제시한다.

## II. 선행연구

### 1. 케이블 운동기구의 동적 부하 특성

케이블 운동기구에서 사용자가 경험하는 운동 부하는 단순히 설정된 중량값에 의해 결정되지 않으며, 운동 수행 과정에서 발생하는 가속도 및 속도 변화에 따라 관성, 감쇠, 마찰 성분이 복합적으로 작용하는 동적 부하 특성을 갖는다[1]. 이러한 특성은 케이블 기반 저항성 운동에서 부하가 시간에 따라 연속적으로 변화하는 물리량임을 의미한다.

기존의 생체역학 및 운동기구 관련 연구에서는 케이블 운동기구에서 형성되는 부하를 중력 성분과 함께 가속도에 따른 관성 항, 속도 의존 감쇠 항, 마찰 항을 모델링하여 설명해 왔다[2-3]. 이러한 모델은 운동 수행 중 나타나는 동적 부하 원리를 정량적으로 해석하는 이론적 기반을 제

공한다.

그림 1은 전통적인 기계식 케이블 운동기구에 서 관찰되는 대표적인 부하 변화 패턴을 개념적으로 나타낸 것이다. 동적 운동 구간에서는 동일한 설정 중량 조건에서도 운동 위상 전환과 가속·감속 변화에 따라 실제 체감 부하가 기준 부하를 중심으로 시간에 따라 연속적으로 변화하는 동적 특성을 보인다.

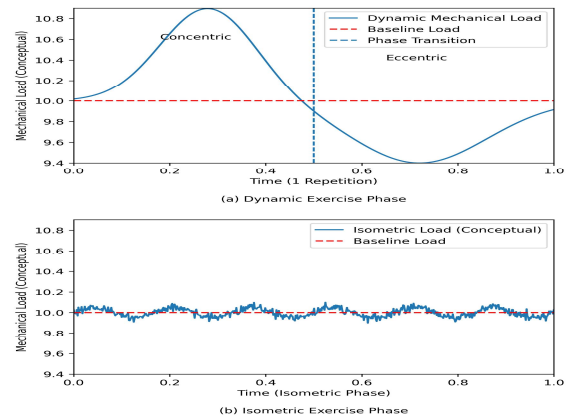


그림 1. 기계식 케이블 운동기구의 동적 부하 특성

반면 등척성 구간에서는 평균 부하는 기준 부하에 근접하게 유지되지만, 근육의 미세 진동 및 기계적 마찰 변화로 인해 작은 변동이 발생한다. 이는 정적 상태에서도 완전한 일정 부하가 유지되지 않음을 보여준다.

기존 연구는 이러한 동적 특성을 분석하거나 훈련 효과를 비교하는 데 초점을 두었으나, 해당 물리적 부하 모델을 실시간 제어 참조 구조로 구현하여 소프트웨어 기반 제어 시스템에 통합한 사례는 최근 시도된 일부 연구[4]를 제외하면 여전히 제한적이다.

### 2. 운동 위상에 따른 운동역학 특성

저항성 운동은 근육 작용 방식에 따라 수축, 이완, 등척성 구간으로 구분되며, 각 구간은 힘 발현 특성과 운동 역학적 조건에서 구조적 차이를 가진다[5]. 수축 구간에서는 능동적 가속이 동반

되며 관성 성분의 영향이 크게 작용하여[6] 부하 변화에 대한 추종 성능이 중요하다. 반면 이완 구간에서는 감속 제어 특성이 나타나[7] 동일한 오차 조건에서도 제어 안정성이 요구된다.

등척성 구간은 위치 변화가 거의 없는 정적 상태로, 이상적으로는 속도와 가속도가 0에 수렴한다[8]. 그러나 실제 환경에서는 센서 노이즈, 미세 자세 변화 및 근육 진동으로 인해 작은 신호 변동이 지속적으로 발생한다. 이러한 조건에서 동적 구간과 동일한 제어 민감도를 적용할 경우, 불필요한 부하 갱신과 출력 진동이 유발되어 제어 안정성이 저하될 수 있다.

일부 상용 디지털 운동기구는 수축·이완 구간에 따라 저항 수준을 조정하는 기능을 제공하지만, 이는 사전 정의된 부하 프로파일이나 모드 기반 전환에 의존하는 경우가 대부분이다. 운동 위상을 제어 이득 조절 변수로 통합하여 실시간 부하 갱신 구조에 직접 반영한 체계적 접근은 충분히 보고되지 않았다.

따라서 운동 위상 정보는 운동 분류 기준이 아니라, 구간별 제어 민감도와 응답 특성을 조정하기 위한 핵심 입력 변수로 활용될 필요가 있다. 이러한 관점은 동적 구간에서는 추종 성능을, 정적 구간에서는 출력 안정성을 확보하기 위한 차별적 제어 구조 설계의 필요성을 제시한다.

### 3. 기존 디지털 케이블 운동기구 제어 구조

현재 상용화된 디지털 케이블 운동기구는 모터 제어를 통해 설정된 부하를 정밀하게 출력할 수 있으나, 대부분 고정된 목표 부하를 유지하거나 사전 정의된 시간 기반 저항 패턴을 재생하는 방식에 기반한다[9]. 이러한 구조는 사용자의 실시간 가속·감속 변화와 운동 위상 정보를 제어 입력으로 직접 반영하지 못하므로, 급격한 동작 전환 시 전통적 기계식 운동기구에서 자연스럽게 형성되는 관성 기반 동적 부하 특성을 재현하는데 한계를 가진다. 그 결과 사용자는 자신의 움

직임에 따라 부하가 형성되는 것이 아니라, 기계가 출력하는 저항 패턴에 동작을 맞추어야 하는 구조적 제약을 갖게 된다.

따라서 사용자의 가속도 및 운동 위상 정보를 실시간으로 참조 부하 생성 과정에 통합하고, 이를 폐루프 제어 구조에 반영할 수 있는 가속도 기반 지능형 제어 프레임워크 도입이 요구된다.

## III. 가속도 기반 동적 부하 제어 알고리즘

### 1. 가속도 기반 동적 부하 제어 시스템

본 절에서는 가속도 기반 동적 부하 모델을 참조 부하 구조로 정의하고, 이를 위상 적응형 누적 피드백 방식과 결합한 폐루프 제어 시스템을 제안한다. 제안된 구조는 전통적 기계식 케이블 운동기구에서 나타나는 가속도 기반 동적 부하 특성을 디지털 환경에서 실시간으로 재현하는 것을 목표로 설계되었다.

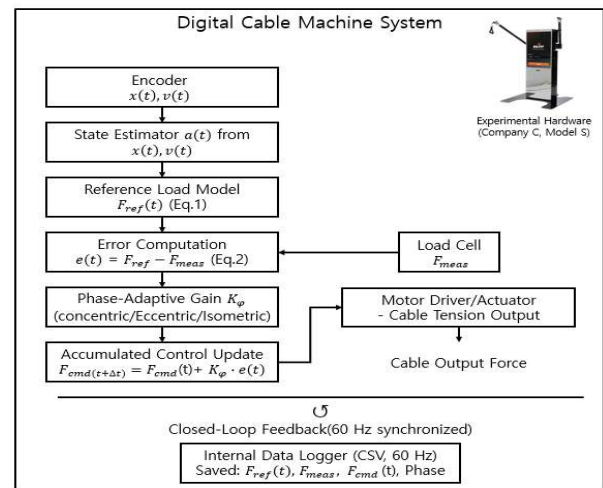


그림 2. 디지털 케이블 운동기구 폐루프 제어 구조

그림 2는 제안된 동적 부하 제어 알고리즘의 전체 처리 과정을 나타낸다. 시스템은 케이블의 속도 및 가속도 정보를 입력받아 동적 부하 모델로부터 동적 부하  $F_{mech}(t)$ 를 생성하고 이를 참조 부하  $F_{ref}(t)$ 로 정의한다. 이후 제어 알고리즘은

참조 부하  $F_{ref}(t)$ 와 실제 측정 부하  $F_{meas}(t)$  간의 오차  $e(t)$ 를 계산하고, 해당 오차를 누적 반영하는 이산형 갱신 구조를 따른다[10].

오차는 운동 위상에 따라 서로 다른 제어 이득  $K_\phi$ 가 적용된 보정량으로 변환되며, 이는 기존 부하 명령에 누적 반영되어 갱신된다. 이때  $K_\phi$ 는 수축, 이완, 등척성 구간의 제어 요구를 반영하기 위해 설정된 위상 적응형 이득으로, 구간별 추종 민감도와 안정성을 조절하는 역할을 한다.

$$F_{mech}(t) = W + m \cdot a(t) + c_v v(t) + \mu_c \cdot sgn(v(t)) \quad (1)$$

케이블의 가속도와 속도를 기반으로 동적 부하  $F_{mech}(t)$ 를 계산하고, 이를 제어 목표인 참조 부하  $F_{ref}(t)$ 로 정의한다. 수식(1)은 해당 동적 부하 모델을 나타낸다.  $F_{mech}(t)$ 는 시간  $t$ 에서 전통적 케이블 운동기구에서 형성되는 실제 부하를 의미하며,  $W$ 는 사용자가 설정한 기준 운동 부하를 의미한다.  $a(t)$ 와  $v(t)$ 는 각각 케이블의 가속도와 속도를 나타내며, 관성 성분  $m$ 과 점성 저항 성분  $c_v$ 을 포함한다.  $\mu_c$ 는 마찰 계수를 의미하며,  $sgn(v(t))$ 는 함수는 케이블 이동 방향에 따른 중력 작용 방향에 따른 부하 변화를 반영한다. 제시한 수식 (1)의 항에서 가속도 항은 운동 시작 및 방향 전환 구간에서 발생하는 관성 성분을 반영하여 동적 부하의 변화를 결정한다. 속도 및 마찰 항은 보조적 안정화 요소로 작용한다.

## 2. 동적 부하 제어 알고리즘

본 절에서는 가속도 기반 참조 부하와 운동 위상 정보를 결합한 동적 부하 제어 알고리즘의 수식적 구조를 설명한다. 제안된 알고리즘은 앞서 언급한 대로 참조 부하와 측정 부하 간의 오차를 기반으로 계산된 동적 부하 제어 명령을 이산적으로 갱신하는 누적형 피드백 구조를 따른다.

$$e(t) = F_{ref}(t) - F_{meas}(t) \quad (2)$$

먼저, 가속도 기반 동적 부하 모델을 통해 생성된 참조 부하  $F_{ref}(t)$ 와 로드셀을 통해 측정된 실제 부하  $F_{meas}(t)$ 를 이용하여 부하 오차  $e(t)$ 를 수식 (2)와 같이 정의한다.

$$F_{cmd}(t + \Delta t) = F_{cmd}(t) + K_\phi(t) \cdot e(t) \quad (3)$$

계산된 오차는 일정한 제어 주기  $\Delta t$ 마다 누적 반영되는 형태로 부하 명령에 적용되며, 부하 명령의 갱신은 수식 (3)으로 표현된다.

여기서  $F_{cmd}(t)$ 는  $t$ 번째 제어 주기에서의 부하 명령 값이며,  $K_\phi$ 는 운동 위상에 따라 조절되는 제어 이득 계수이다. 수축, 이완, 등척성 구간은 운동 역학적으로 서로 다른 제어 방식을 요구하기 때문에 각 구간에 대해 서로 다른 제어 이득을 적용하여 추종 민감도와 안정성을 조절한다. 특히 등척성 구간에서는 미세 오차로 인한 불필요한 부하 갱신을 방지하기 위해 일정 범위 내 오차에 대해 보정 동작을 제한하는 오차 허용 구간(Deadband)을 적용한다[11].

등척성 구간에서는 평균 오차보다 출력 부하의 변동성이 제어 안정성을 반영하는 핵심 지표가 된다. 따라서 본 연구에서는 해당 구간에서 측정 부하 및 제어 명령의 표준편차를 안정성 평가 기준으로 활용한다. 이는 미세 센서 변동이 제어 루프에 과도하게 반영되는지를 판단하기 위한 지표이다.

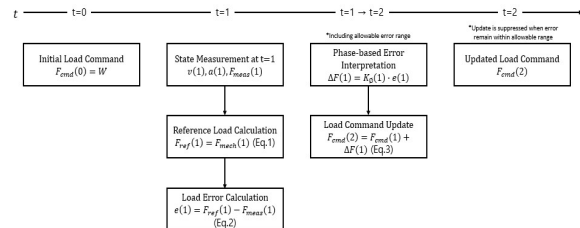


그림 3. 동적 부하 제어 알고리즘 제어 주기별 흐름도

그림 3은 제안된 알고리즘의 제어 주기별 처리

과정을 나타낸 것이다. 제어 과정은 운동 수행 시작 시점  $t=0$ 에서 초기 부하 명령  $W$ 를 사용자 설정 기준 부하로 설정한다. 각 주기에서 센서 데이터 취득, 참조 부하 계산, 오차 산출, 위상 판정 및 이득 선택, 부하 명령 갱신이 순차적으로 수행되며, 갱신된 부하 명령은 다음 주기의 입력으로 사용된다. 이러한 반복 구조를 통해 출력 부하  $F_{cmd}(t)$ 는 사용자의 운동 상태 변화에 실시간 적응적으로 조정된다.

### 3. 운동 위상별 동적 부하 제어 해석

본 절에서는 제안된 가속도 기반 동적 부하 제어 알고리즘에서 적용된 위상별 제어 구조가 운동 수행 과정의 운동 역학적 특성과 어떻게 연계되는지를 분석한다. 특히 수축, 이완, 등척성 구간에서 서로 다른 제어 계수와 누적 보정 구조가 부하 추종 성능과 시스템 안정성에 미치는 영향을 중심으로 해석한다.

수축 구간에서는 사용자가 중력 방향에 저항하여 케이블을 당기는 과정에서 능동적인 힘을 지속적으로 생성하게 된다. 이러한 과정에서 가속도 변화와 관성 성분이 크게 나타난다. 수축 구간에서는 참조 부하의 변동 폭이 상대적으로 크므로, 오차에 대한 빠른 보정이 요구되며, 제안된 알고리즘에서는 가장 높은 제어 계수를 적용하여 동적 구간에서의 추종 지연을 최소화하고 부하 반응의 민감도를 향상한다.

이완 구간에서는 중력에 의해 케이블이 하강하려는 힘, 속도를 제어하기 위한 사용자의 제동력, 그리고 설정 저항을 유지하기 위한 시스템 출력이 동시에 작용하여 출력 특성이 비선형적으로 변화할 수 있다. 따라서 이완 구간에서 과도한 제어 이득이 적용은 출력 진동이나 불안정성이 발생시킬 수 있어 중간 수준의 제어 계수를 적용하여 추종 성능과 안정성 간의 균형을 유지한다.

등척성 구간은 위치 변화가 거의 발생하지 않는 정적 상태로, 이상적으로는 속도와 가속도가

0에 수렴하는 형태를 보인다. 그러나 실제 운동 환경에서는 센서 노이즈, 미세한 자세 변화, 근육 떨림 등에 의해 작은 오차가 지속적으로 발생할 수 있다. 이때 높은 제어 이득이 적용되면 출력 변동이 누적되어 부하 명령 값의 진동 현상이 발생할 수 있으므로, 가장 낮은 제어 이득 계수값과 Deadband를 통해 출력 변동을 억제한다.

위상별 제어 계수 설정은 시스템의 페루프 동특성에도 직접적인 영향을 미친다. 높은 이득은 응답 속도를 향상하는 반면, 위상 지연과 잡음 증폭을 증가시킬 수 있다. 반대로 낮은 이득은 안정성을 확보하는 데 유리하지만, 추종 지연이 증가할 수 있다. 제안된 알고리즘은 이러한 상충 관계를 고려하여, 각 운동 위상에 최적화된 이득 분포를 적용함으로써 전체 시스템의 안정성과 응답성을 동시에 확보한다.

## IV. 실험 및 실험 결과

### 1. 실험 설계

본 연구는 제안한 가속도 기반 동적 부하 제어 알고리즘의 동적 추종 성능과 정적 구간 출력 안정성을 검증하기 위해 모터 기반 디지털 케이블 운동기구 환경에서 실험을 수행하였다. 모든 실험은 동일한 하드웨어 구성과 제어 주기 조건에서 CSV 형태로 수집되었다.

표 1. 동적 부하 모델 및 제어 알고리즘 계수

구분	기호	설정값
관성 계수	$m$	1.20
속도 감쇠 계수	$c_v$	0.20
마찰 계수	$\mu_c$	1.20
수축 민감도	$K_e$	0.05
이완 민감도	$K_e$	0.10
등척성 민감도	$K_i$	0.03
등척성 허용폭	$B_i$	0.05

표 1은 실험에 사용된 동적 부하 모델 계수와 위상별 제어 이득 값을 나타낸다. 해당 계수는 실험 장비의 모터 특성을 반영하여 전통적 케이

블 운동기구의 동적 부하 특성을 재현할 수 있는 범위 내에서 반복 실험을 통해 안정적으로 동작하는 조합으로 설정하였다.

실험 대상자는 정상적인 상지 운동 수행이 가능한 성인 3명으로 구성하였다. 개인별 근력 차이에 따른 영향을 최소화하기 위해, 사전 측정을 통해 각 대상자가 1세트 10회 반복 수행이 가능한 수준으로 기준 부하를 설정하였다. 실험 동작은 위상 구분이 명확하고 반복 재현성이 높은 케이블 기반 암 컬(Arm Curl)을 활용하였다.

동적 운동 구간에서는 수축·이완을 포함한 10회 반복을 3세트 수행하였으며, 등척성 유지 동작은 각 세트당 30초씩 2세트를 수행하였다. 동적 구간은 반복 단위로 분할하여 참조 부하와 측정 부하 간 추종 특성을 분석하였고, 등척성 구간은 30초 구간을 5초 고정 시간 구간으로 분할하여 출력 변동성을 산출하였다.

## 2. 평가 지표 및 데이터 분석 방법

본 절에서는 3장에서 정의한 동적 추종 성능 및 정적 안정성 평가 기준에 따라 상관계수 및 지연 보정 값을 산출하였다. 입력 가속도와 참조 부하 간의 상관계수  $r_{valid}$ , 참조 부하와 측정 부하 간의 시점 보정 전 상관계수  $r_{raw}$ 는 모두 피어슨 상관계수를 통해 계산하였다.

구조적 시간 지연을 보정하기 위해 시간 이동 변수  $\Delta t$ 를 변화시키며 상관계수를 탐색하였으며, 상관계수가 최대가 되는 시프트 값을 최적 지연 시간  $\tau$ 로 정의하였다. 최적 시프트는 수식 (4)와 같이 표현된다.

$$\tau = \arg \max_{\Delta t} r(F_{ref}(t), F_{meas}(t + \Delta t)) \quad (4)$$

지연 보정 후에는 추정된  $\tau$ 를 적용하여 정렬된 상관계수  $r_{aligned}$ 를 산출하였다. 이는 구조적 지연 영향을 제거한 상태에서의 실질적 파형 추종 성능을 나타낸다. 한편, 등척성 구간에서는 측정

부하나 제어 명령의 표준편차를 계산하여 출력 안정성을 평가하였다.

## 3. 실험 결과

본 절에서는 실험 설계와 평가 지표 및 데이터 분석 결과를 중심으로, 제안된 가속도 기반 동적 부하 제어 알고리즘의 동적 구간 추종 성능과 정적 구간 안정성을 분석하였다.

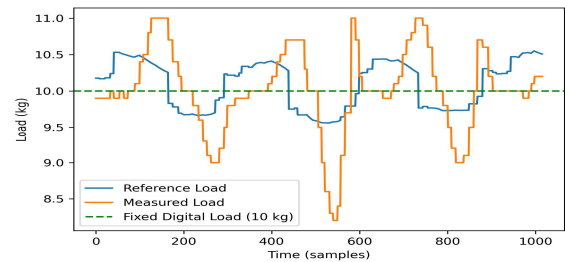


그림 4. 동적 운동 구간 운동 부하 특성

그림 4는 대표 반복 구간에서 참조 부하와 측정 부하를 시점 보정 없이 비교한 결과이다. 제안 알고리즘은 일정한 부하를 출력하는 기존 디지털 케이블 운동기구와 달리 가속도 기반 모델에 따라 수축 구간에서는 기준 부하보다 크게, 이완 구간에서는 작게 형성되는 동적 부하 패턴을 생성하였다. 이는 전통적 기계식 케이블 운동기구에서 나타나는 관성 기반 동적 부하 특성과 일치하는 형태이다. 그러나 측정 부하는 참조 부하의 형태를 추종하면서도 일정한 위상 지연을 보였으며, 이는 제어 연산, 통신 및 구동 응답 과정에서 발생하는 구조적 시간 지연에 기인한다.

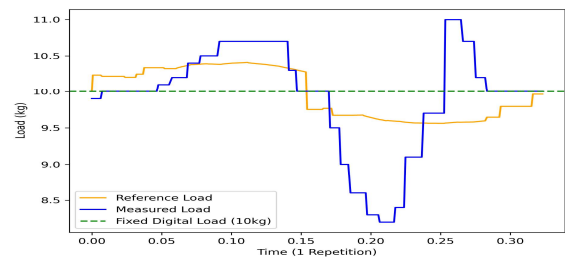


그림 5. 시점 보정 후 참조 부하와 측정 부하 비교

그림 5는 제안된 가속도 기반 동적 부하 제어 알고리즘이 적용된 1회 반복 구간의 부하 변화를 나타낸 것이다. 참조 부하는 앞선 선행 연구에서 제시한 것처럼 가속도 기반 모델에 따라 수축 구간에서는 기준 부하보다 크게, 이완 구간에서는 작게 형성되도록 설계되어 형태를 보인다. 측정 부하는 이를 추종하나, 신체 분절의 관성 효과, 케이블 및 풀리 시스템의 마찰과 장력 변화, 모터 응답 지연, 그리고 사용자 근육 수축 특성에 따른 능동적 힘 조절 등의 운동 역학적 요인에 의해 진폭 및 위상 차이가 발생한다.

표 2. 동적 운동 구간 실험 결과

Subject	$r_{valid}$	$r_{raw}$	$r_{aligned}$	$\tau$ (ms)
A	0.8235	0.1408	0.5628	501.7
B	0.7650	0.2635	0.5294	291.7
C	0.7713	0.4634	0.5872	275.0
All	0.7866	0.2892	0.5598	356.1

표 2는 동적 운동 구간을 반복 횟수 단위로 분석한 결과이다. 평가 지표는 각 반복 구간별 상관계수를 산출한 후 평균값을 도출하였다. 전체 피험자 평균  $r_{valid}$ 는 약 0.79로 나타나 가속도 기반 참조 모델의 내부 타당성이 확보되었으며, 시간 정렬을 수행하지 않은 상태의  $r_{raw}$ 는 평균 0.29 수준으로 구조적 지연의 영향을 반영하였다. 이동 윈도우 기반 시점 보정 후  $r_{aligned}$ 는 평균 0.56으로 상승하여 참조 부하와 측정 부하 간의 동적 패턴 유사도가 향상됨을 확인하였다.  $\tau$ 는 피험자별로 240~530ms 범위에서 관측되었으며, 모든 피험자에서 구조적 시간 지연이 일관되게 나타났다. 이는 해당 지연이 개인별 수행 특성의 차이와 무관하게 폐구조 시스템 아키텍처에서 기인한 구조적 특성임을 시사한다.

등척성 구간은 케이블 위치 변화가 거의 없는 정적 상태로, 이상적인 제어 출력은 목표 부하를 일정하게 유지해야 한다. 따라서 해당 구간에서는 평균 오차보다 시간에 따른 출력 변동성이 제어 안정성을 직접적으로 반영한다.

그림 6은 등척성 구간의 고정 시간 구간에서 Deadband 적용 전·후의 측정 부하 변화를 비교한 결과를 나타낸다. Deadband 미적용 시 기준 부하 주변에서 출력이 빈번하게 변동하는 반면, Deadband 적용 후 허용 구간 내에서 제어 갱신이 억제되어 출력 변동성이 감소함을 보인다.

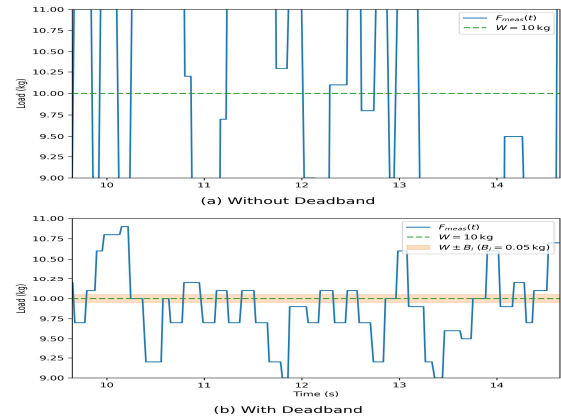


그림 6. 등척성 구간 Deadband 적용 전·후 부하 변화

본 연구에서는 등척성 구간의 출력 안정성을 평가하기 위해 측정 부하의 표준편차  $\sigma_{meas}$ , 최대 편차, 그리고 제어 명령의 표준편차  $\sigma_{cmd}$ 를 각각 산출하여 Deadband 적용 전·후를 비교하였다.

표 3. 정적 운동 구간 실험 결과

Subject	Condition	$\sigma_{meas}$ (kg)	최대 편차 (kg)	$\sigma_{cmd}$ (kg)
A	Without Deadband	2.2122	5.0556	5.0000
	With Deadband	0.3558	0.9693	0.9999
B	Without Deadband	0.5033	0.8719	0.5444
	With Deadband	0.2944	0.8278	0.3104
C	Without Deadband	0.1643	0.4370	0.1688
	With Deadband	0.1003	0.5189	0.1172
Avg.	Without Deadband	0.96	2.1215	1.9047
	With Deadband	0.2502	0.772	0.4758

표 3은 등척성 운동구간 실험 결과를 보여준다. Deadband 미적용 시에는 미세한 센서 노이즈가 제어 루프에 반영되어 제어 명령이 지속적으로 변동하였으며, 평균 최대 약 2.12kg 수준의 출력 편차가 관찰되었다. 반면 Deadband 적용 후에는  $\sigma_{cmd}$ 가 평균 0.48kg 수준으로 감소하여 불필요한

부하 갱신이 억제되었으며, 이에 따라  $\sigma_{meas}$  또한 평균 0.25kg 수준으로 감소하여 시스템의 정적 안정성이 확보됨을 확인하였다.

## V. 결론 및 향후 연구

본 연구는 디지털 케이블 운동기구 환경에서 사용자의 가속도 변화를 제어 입력으로 활용하여 동적 부하를 생성하는 소프트웨어 기반 제어 프레임워크를 제안하였다. 가속도 기반 참조 모델과 위상 적응형 누적 피드백 구조를 결합함으로써, 운동 위상에 따른 차별적 제어 요구를 통합적으로 처리할 수 있는 구조를 구현하였다.

실험 결과, 동적 구간에서는 가속도 기반 참조 모델의 내부 타당성이 확보되었으며, 시점 보정 적용 시 참조 부하와 측정 부하 간의 동적 패턴 유사도가 유의하게 향상됨을 확인하였다. 또한 등척성 구간에서는 Deadband 적용을 통해 출력 변동성이 감소하여 정적 안정성이 확보되었다. 구조적 응답 지연은 평균 356ms로 관측되었으며, 이는 현재 분산 제어 아키텍처에서 발생하는 시스템 특성으로 해석된다.

향후 연구에서는 제어 루프를 임베디드 환경으로 통합하고, 예측 기반 피드포워드 보상 구조를 도입하여 구조적 지연을 최소화할 필요가 있다. 또한 장기간 축적되는 운동 데이터를 활용한 파라미터 자동 최적화 및 사용자 적응형 제어 구조로의 확장이 가능하다. 본 연구는 디지털 케이블 운동기구를 정적 저항 출력 장비에서 사용자 움직임에 적응하는 지능형 제어 소프트웨어 플랫폼으로 전환하기 위한 구조적 기반을 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

## REFERENCES

- [1] K. Tan, H. Shi, X. Mei, T. Geng, and J. Yang, "Control of force transmission for cable-driven actuation system based on modified friction model with compensation parameters," *Control Engineering Practice*, vol. 151, p. 106035, Oct. 2024.
- [2] L. Guagliumi, A. Berti, E. Monti, M. Fabritius, C. Martin, and M. Carricato "Force-sensor-free implementation of a hybrid position-force control for overconstrained cable-driven parallel robots," *Robotics*, vol. 13, no. 2, p. 25, Jan. 2024.
- [3] W. Kraus, M. Kessler, and A. Pott, "Pulley friction compensation for winch-integrated cable force measurement and verification on a cable-driven parallel robot," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1627-1632, Seattle, WA, USA, May 2015.
- [4] S. Moromugi, S. J. Yoon, S. H. Kim, M. Tanaka, Y. Ohgiya, N. Matsuzaka and T. Ishimatsu, "A training machine with dynamic load-control function based on muscle activity information," *Artificial Life and Robotics*, vol. 10, no. 2, pp. 126-130, Nov. 2006.
- [5] J. L. Nuzzo, M. D. Pinto, K. Nosaka and J. Steele, "The eccentric:concentric strength ratio of human skeletal muscle in vivo: Meta-analysis of the influences of sex, age, joint action, and velocity," *Sports Medicine*, vol. 53, no. 6, pp. 1125-1136, May 2023.
- [6] A. Muñoz-López, P. Floría, B. Sañudo, J. Pecci, J. C. Pérez and M. Pozzo, "The maximum flywheel load: A novel index to monitor loading intensity of flywheel devices," *Sensors*, vol. 21, no. 23, p. 8124, Dec. 2021.
- [7] P. C. LaStayo, J. M. Woolf, M. D. Lewek, L. Snyder-Mackler, T. Reich and S. L. Lindstedt, "Eccentric muscle contractions: Their contribution to injury, prevention, rehabilitation, and sport," *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, vol. 33, no. 10, pp. 557-571, Oct. 2003.
- [8] M. Gepfert, K. Kotuła, J. Walencik, J. Jarosz, N. Brzeczek and A. Gołaś, "Comparative effects of movement-pattern-oriented and isometric training on neuromechanical performance in track and field athletes," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 19, p. 10724, Oct. 2025.
- [9] Digital strength training(2018) <https://patents.google.com/patent/US20180021616A1/en> (accessed Feb.23.2026).
- [10] J. Zhang, S. Liu, Z. Yang, Y. Zhang, L. Guan, and G. Zhang, "The application of incremental PID control algorithm in large tuning camera," *Procedia Computer Science*, vol. 228, pp. 1240-1245, 2023.
- [11] S. Küçükdermenci, "Implementation of deadband-enhanced PID position control using LabVIEW and Arduino for DC motor systems,"

*Proc. of 7th International Conference on Innovative Academic Studies*, pp. 479-485, Konya, Turkey, Sep. 2025.

저자 소개



윤준혁(정회원)

2019년~현재 숭실대학교 미디어학과 석박통합과정

2012년 숭실대학교 글로벌미디어학부 학사 졸업.

<주관심분야 : 스포츠-IT융복합, 인공지능, 지능정보처리>



남동현(정회원)

2022년~현재 메타버스·문화콘텐츠학과 석박통합과정

2022년 숭실대학교 영어영문학과 학사 졸업

<주관심분야 : 스포츠-IT융복합, 인공지능, 지능정보처리>



고일주(정회원)

2003년~현재 숭실대학교 글로벌미디어학과 교수

2002년 2월 숭실대학교 전자계산학과 박사 졸업

1994년 2월 숭실대학교 전자계산학과 석사 졸업

1992년 2월 숭실대학교 전자계산학과 학사 졸업

<주관심분야 : 스포츠-IT융복합, 인공지능, 지능정보처리, 소매틱스, 문화치유>