

# 마찰 보상 알고리즘을 적용한 저항운동 시뮬레이터의 힘제어 Force control of resistance training simulator with nonlinear friction compensation

\*김경남<sup>1</sup>, 박재우<sup>1</sup>, #홍대희<sup>1</sup>

\*K. Kim<sup>1</sup>, J. W. Park<sup>1</sup>, #D. Hong(dhhong@korea.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학과

Key words : haptic, weight training, friction compensation, force control

## 1. 서론

저항운동(resistance training)은 건강(health)과 운동수행능력(performance)의 향상과 관련이 있다.[1] 저항운동은 근육의 힘, 파워, 지속성, 에슬레틱 퍼포먼스등을 향상시켜줄 뿐만 아니라 부상당한 신경근의 재활을 위한 주요방법으로 지금까지 활용되어 왔다. 현재까지는 이러한 저항운동을 하기 위한 방법으로 피트니스 센터등에서 프리 웨이트(덤벨, 바벨)나 케이블-폴리 구조로 구동되는 웨이트-스택등을 사용한 간단한 머신등이 주로 사용되었다. 그리고 계속되는 연구를 통해 얻어낸 보다 적절한 운동기구들이 여러 회사에 의하여 점차적으로 보급되어 왔다. 현재 상용화되어 있는 저항운동기구는 대부분 폴리-웨이트 기구, 스프링 반력기구, 마찰기구 및 프리 웨이트로 구성되어 있으며, 캠이나 레버등을 조작하여 원하는 저항운동을 위한 저항값의 적절한 조절이 가능하다. 하지만, 이러한 기본적인 조절이 다소 가능하다 할지라도, 기존 운동기구를 통한 저항운동의 프로파일은 인간의 의공학적 특성과 일치하지 못하다는 것을 실험적으로 알아내었다. 이러한 인간 개개인의 의공학 특성을 고려한 저항운동은 스포츠 공학, 재활분야에서 특히 필요하며, 이를 위해서 맞춤형 저항운동기구들을 고안하여 사용하여 왔다.

햅틱기술을 이용하여 저항운동을 할 수 있는 시뮬레이터를 설계할 경우 햅틱 디스플레이(haptic display)가 운동자(human operator)에게 전달하는 힘(force feedback)을 이용하여 저항운동을 할 수 있다.[2] 또한 알맞은 경로를 가상 환경(virtual environment)을 통해 가상경로(virtual path) 구현하면 보조자나 개인트레이너의 자세 지도 없이도 가상경로가 따라 안전하게 바른 자세에서 저항 운동을 할 수 있다. 또한 운동자의 자세를 실시간으로 측정하여 운동자가 자신의 자세를 전면의 화면을 통해 볼 수 있게 함으로써 바른 자세에서 저항운동을 할 수 있다. 더 나아가 햅틱 디스플레이가 운동자가 저항운동을 하는 동안 실시간으로 변하는 몸의 각도와 그 각도에서의 근육의 활성화도에 따라 알맞은 각도와 크기로 힘을 전달할 수 있다. 따라서 오로지 중력 방향으로 일정한 무게로만 힘을 전달하는 프리 웨이트를 이용한 저항운동보다 개인의 목적과 특성에 맞는 맞춤형 운동에 적합하다.[3,4]

이 논문에서는 기존에 설계된 햅틱-기술을 기반으로 한 저항운동장치의 제어를 위한 방법을 소개한다. 많은 운동 중에서 이센트릭 운동을 택하였고, 이를 구현하기 위한 마찰력, 중력등을 보상한 힘제어 방법을 구현하였다. 기존에 미리 설계된 저항운동장치의 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

## 2. 이센트릭(Eccentric) 운동을 위한 제어기법

이센트릭 운동을 구현하기 위해서는, 컨센트릭 운동과는 달리, 시뮬레이터의 힘제어를 통해 원하는 힘을 매 순간마다 사용자에게 전달해 주어야 한다. 통상적으로 실시하고 있는 일반 힘제어와 다른 점은 인간-로봇 접촉 시 반드시 충족시켜야 할 패시비티(passivity) 조건을 만족할 수 없기 때문에 PID 게인 선정에 보다 더 어려움이 있다.[5] 즉, 장착된 포스/토크센서를 사용하여 피드백 제어 시, 시스템의 빠른 응답성을 위해서 포스 피드백 루프의 이득값을 크게 한다면 순간적으로 과도한 힘을 전달하여 사용자에게 위험을 줄 수 있으며, 반대로 게인값이 너무 작을 경우, 시스템의 응답성이 매우 저하되어 구현하고자 하는 개인의 최적운동을 효율적으로 이루지 못할 수가 있다. 오픈-루프(open-loop)를 사용하여 힘제어를 수행한다면 사용자의 안전에 관련된 문제는 어느 정도 해결이 가능하지만, 사용자에게 전달하고자 하는 힘을 실시간으로 정확히 가해 주기 위해서는, (특히, 저속에서나 속도의 부호가 바뀔 때 큰 오차를 발생시키는) 마찰력을 포함한 외란 성분에 관한 비선형적 파라미터들이 전체 시스템의 동역학 식에 정확히 수학적으로 모델링 되어야 하기 때문에 이 또한 현실적으로 불가능하다. 이 논문에서는 위와 같은 현상들을 고려하여 마찰력, 중력 등으로 인한 성분만을 선보상하고, 시뮬레이터의 정확한 힘제어를 위하여 PID 제어기를 사용하여 전체 제어 시스템을 구성하였다. Fig.1에 전체적인 구성도를 정리하여 나타내었다.

저항운동기구 시뮬레이터의 힘을 제어하기 위해서 PID 제어기를 사용하였으며, 이는 포스/토크센서(force/torque sensor)에서 측정된 사용자에게 전달되고 있는 힘과 레퍼런스 힘과의 차를 PID 제어하여 나온 힘이다. 그 식은 (1)과 같다.

$$F_{pid}(s) = [K_p + K_d \cdot s + \frac{K_i}{s}] [F_{des} - F_{human}] \quad (1)$$

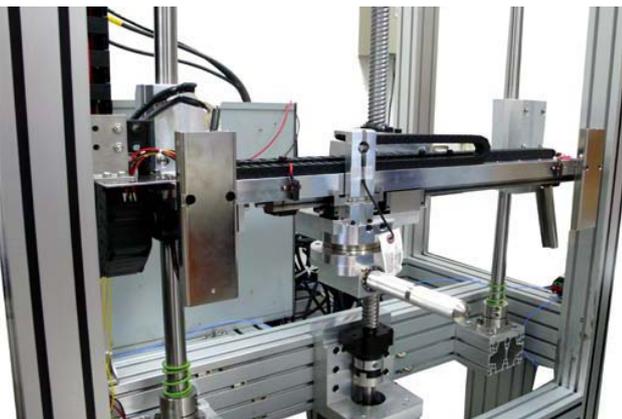


Fig. 1 Front view of resistance training simulator

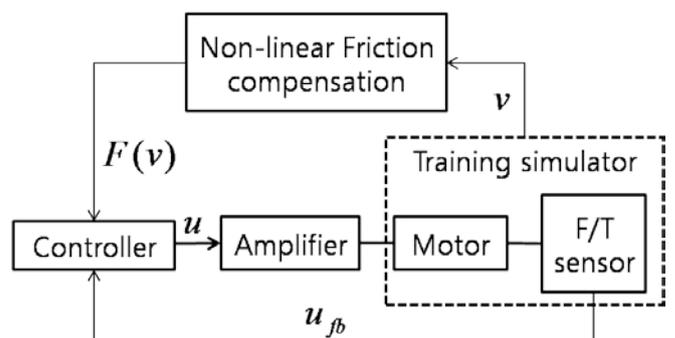


Fig. 2 Force control schematic of resistance training simulator

그리고 중력은 직교 좌표계에서 항상 아래방향으로 작용하므로 중력보상은 Z 축으로 mg 만큼 보상해 주면 된다. 중력을 보상하여 이센트릭 운동 구현 시, 보상을 하지 않았을 경우에 비하여 제어 입력값이 작아지기 때문에 시스템의 응답이 보다 빨라진다. 또한, 실제 시스템에서의 관성은 운동자의 운동속도의 변화에 따라 달라지기는 하지만, 일반적인 이센트릭 운동 시 사용자 운동속도의 변화는 크지 않다고 판단할 수 있기 때문에 이에 대한 보상은 제외하였다.

### 3. 비선형적 마찰력 모델을 통한 힘제어 기법

모든 기계시스템에는 필연적으로 마찰력이 존재한다. 시뮬레이터의 서보제어 시스템에 존재하는 마찰력은 저속에서나 속도의 부호가 바뀔 때 큰 오차를 발생시키는 원인이 된다. 이장에서는 시뮬레이터의 수직방향 구동시 존재하는 마찰력을 보상함으로써 힘제어 응답성을 향상시킬 수 있는 방법에 대해 나타내었다. 이를 위해 시뮬레이터에 존재하는 마찰력을 속도에 관한 함수로 모델링하였다. 먼저, 통상적으로 많이 쓰이고 있는 루그리 모델(LuGre model)을 시뮬레이터의 마찰보상을 위한 방법으로 적용하였고. 이는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.[6]

$$F(v) = [F_c + (F_s - F_c)e^{-\frac{|v|}{v_s}}] \text{sgn}(v) + \beta v \quad (2)$$

$F(v)$  : 마찰력       $v_s$  : 스트라이백(stribeck) 속도  
 $\beta$  : 점성마찰계수       $F_c$  : 쿨롱마찰계수  
 $v$  : 시뮬레이터 손잡이의 수직방향 속도

마찰력-속도 곡선을 구하기 위한 방법으로 수직방향 구동모터의 힘제어를 통하여 원하는 속도 별로 움직이게 하였다. 이 경우 구동 시 발생하는 외란 등에 대한 영향을 극복하여 원하는 속도로 움직이게 제어 입력값을 넣어 주어야 하기 때문에 비례제어 이득값을 크게 설정하였다. 위와 같은 방법으로 수직구동 시 작용하는 마찰력값을 간접적으로 구할 수 있다. 그림 3 은 실험적인 방법으로 구해낸 마찰력-속도 곡선을 나타내었다. 이 마찰력-속도 곡선은 13 개의 각각 다른 속도(0.27 rad/s ~ 5.30 rad/s)에 따라서 측정하였다. 또한, 유사한 결과를 음의 방향의 속도에 대해서도 얻을 수 있었다. 수직방향 운동 시 작용하는 마찰력을 구하기 위한 마찰력 모델변수를 테이블 1 에 나타내었다. 마찰모델에 관련된 변수는 총 4 가지로 요약할 수 있다. 위와 같은 방법으로 구한 마찰력에 관한 모델을 식(1)에 적용하여 최종적으로 식(3)과 같이 적용할 수 있다.

$$u = F_{PID} + F(v) \quad (3)$$

$F_{PID}$  : 포스피드백 입력값,  $u$  : 최종 컨트롤 입력값.

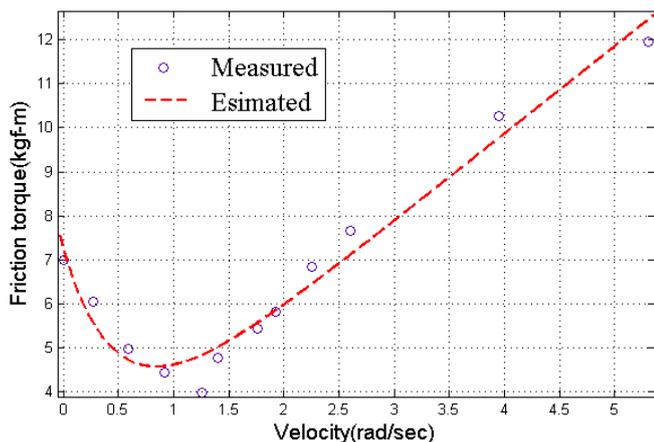


Fig. 1 Vertical direction actual force and desired force

Table 1 Identified friction elements

Friction elements	Identified results
Static friction element $m/s$	7.262
Coulomb friction element $m/s$	1.913
Viscous friction element $m/s$	1.987
Stribeck velocity element	0.6

### 4. 결론

기존의 저항운동기구나 프리웨이트의 경우 운동경로에 따른 저항을 능동적으로 제어 할 수 없었으므로 운동 경로에 따라 능동적으로 저항을 달리 하였을 경우에 대한 연구가 이루어 지지 않았다. 하지만 운동 경로에 따라 저항을 달리하는 연구를 통하여 개인의 목적에 맞는 개인 맞춤형 운동기구의 개발이 가능하다.[7] 본 논문에서는 개인 맞춤형 운동기구를 구현하기 위하여 3 자유도 운동이 가능하고 2 자유도 저항전달이 가능한 저항운동 시뮬레이터의 제어 기법에 대하여 소개하였다. 그 중에서도 특히 이센트릭 운동을 하기 위한 방법을 구현하였다. 이센트릭 운동을 위해서는 힘제어가 필수적이고, 힘제어를 원활히 하기 위해서는 마찰력등의 보상이 필요하다. 이를 위하여 비선형적인 특성을 나타내는 마찰력을 모델링하고, 힘제어에 사용하기 위한 마찰력에 관련된 파라미터들을 추출해 내어 제어입력값 계산 시 선보상(feedforward)하였다. 이를 통하여 사용자에게 적절한 저항값을 빠르게 전달해 줄 수 있기 때문에 원하는 개인맞춤형 운동이 가능하다. 하지만 피드백(feedback)된 힘제어를 통하여 사용자에게 저항을 전달해 줄 경우, 과도한 값을 순간적으로 전달해 줄 수 있기 때문에 각별히 주의 해야 할 것이다. 향후, 사용자의 안전을 최우선적으로 고려하면서도 빠른 응답성을 가질 수 있는 제어기법에 대한 연구가 필요하다.

### 후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0001647).

### 참고문헌

1. Stone, M. H., S. J. Fleck, W. J. Kraemer, and N. T. Triplett, "Health and performance related adaptations to resistive training," *Sports Med*, **11**, 210-231, 1991.
2. R. J. Adams and B. Hannaford, "Stable haptic interaction with virtual environments," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, **15**, NO.3, 465-474, 1999.
3. Li, P.Y., and Horowitz, R., "Control of smart exercise machines .1. Problem formulation and nonadaptive control," *Ieee-Asme Transactions on Mechatronics*, **2**, 237-247, 1997.
4. Li, P.Y., and Horowitz, R., "Control of smart exercise machines .2. Self-optimizing control," *Ieee-Asme Transactions on Mechatronics*, **2**, 248-258, 1997.
5. Li, P.Y., and Horowitz, R., "Passive velocity field control of mechanical manipulators," *Ieee-Asme Transactions on Robotics and Automation*, **15**, 751-763, 1999.
6. H.Olsson and P. Lischinsky, "A new model for control of systems with friction" *IEEE Transactions on automatic control*, **40**, 419-425, 1995.
7. Carignan, C. R., Tang, J. and Ieee, "A haptic control interface for a motorized exercise machine", in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2055-2060, Pasadena, CA, 2008.