

# 임피던스 컨트롤을 이용한 햅틱기반 저항운동 시뮬레이터 haptic-based resistance training simulator employing impedance control

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

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

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학과

Key words : haptic, resistance training, impedance control

## 1. 서론

저항운동은 운동 방법에 따라 힘, 파워, 근지구력을 상승시킬 수 있을 뿐만 아니라 건강상태 개선과 근육의 크기 증가에 효과가 있다.[1] 저항운동 변수(program variable)는 (a) 근육의 움직임(muscle action), (b)저항의 크기인 로드(load)와 일의 양을 나타내는 볼륨(volume), (c)레그익스텐션(leg extension)이나 바이셉스 컬(biceps curl) 같이 하나의 관절을 이용하는 운동(single joint exercise)과 스쿼트(squat)나 데드리프트(dead lift)같은 다관절 운동(multi joint exercise) 중에서의 선택(selection of exercise), (d)세트 사이의 휴식 시간(rest period), (e)반복 속도(repetition velocity), 그리고 (f)운동 빈도(frequency)등이 있다.[2] 따라서 개인의 목적에 맞는 특정한 운동 효과를 얻기 위해서는 적절한 저항운동 변수들의 선택하여 저항운동을 계획하는 것이 중요하다.[3] 지난 50년 동안 연구자들은 특정한 운동효과를 얻기 위한 저항운동방법을 연구하였다. 예를 들어 볼륨 및 휴식시간과 관계가 있는 단일 vs. 복합 세트 (single vs. multiple set), 근육의 움직임 및 반복 속도와 관계가 있는 동심성 vs. 편심성 움직임(concentric vs. eccentric action), 그리고 운동의 선택과 관계가 있는 고립 vs. 복합 움직임(isolation vs. compound movement)에 대한 연구가 진행 되어왔다.[2, 4, 5] 또 지난 수십 년 동안 상업 운동기구 회사들은 저항운동기구를 개발 하였다. 프리웨이트(free weight)를 비롯하여 풀리(pulley)나 스프링(spring) 그리고 마찰(friction)을 이용한 상업 저항 운동기구들을 개발 하였다. 이러한 운동기구들을 통하여 저항의 크기나 근육의 움직임 등을 다양하게 조절할 수 있게 되었다. 하지만 인간의 움직임은 매 순간 근육의 움직임과 속도 및 위치에 따라 최대한으로 낼 수 있는 힘이 다른데 비하여 기존의 상업 저항운동기구들은 운동 중에 로드의 크기 및 방향을 변화 할 수 없으며 그것을 전제로 한 운동 방법이 주로 연구 되었다. Li 는 근육의 힘-속도-위치(force-velocity-position)관계 모델인 Hill surface 와 저항을 실시간으로 조절 가능한 1 자유도 댐퍼(damper)를 이용하여 같은 수준의 운동을 하는데 필요한 시간을 최소화 할 목적으로 ‘Smart Exercise Machine’을 제안 하였다. [6, 7] Carignan 은 상업 운동기구인 Keiser Inc. 이두근 운동기구의 1 자유도 공압 피스톤을 SmartMotor 에 의해 구동되는 리드 스크루(lead screw)로 교체하여 실시간으로 저항을 조절 할 수 있는 ‘Motorized Exercise Machine’을 제안하였다.[8] Deneve 는 3 자유도 상지(upper limb)운동이 가능하고 운동 특성에 따라 제어방법(control law)를 선택할 수 있는 ‘rehabilitation robot’을 제안 하였다.[9] 하지만 Li 와 Carignan 가 제안한 모델의 경우 1 자유도의 저항만 조절 할 수 있으므로 다자유도 운동을 하는 인간의 움직임에 적합하지 않으며 Deneve 가 제안한 모델은 open chane 의 Articulated robot 을 사용하여 엔드 이펙터(end-effector)에서 운동자에게 전달 할 수 있는 저항이 매우 제한적이어서 재활 목적으로 움직임에 도움을 주는 데는 유용하지만 저항운동을 하기에는 적합하지 않다. 본 논문에서는 인간의 움직임에 더 적합한 2 자유도 운동이 가능하면서 운동자가 저항운동을 할 수 있을 정도의 충분한 저항의 크기를 전달 할 수 있는 2 자유도 저항운동 시뮬레이터(resistance training simulator)를 제안한다.

## 2. 저항운동 시뮬레이터

저항운동 시뮬레이터는 Y-Z axis 2 자유도 운동을 할 수 있는 Cartesian robot 으로 제작 하였다. 본 논문에서는 서서하는 상완 이두근 운동(standing biceps curl)에 초점을 맞추었고 Z 방향은 Y 방향에 비하여 큰 힘과 넓은 구동범위가 필요하므로 AC 서보 모터로 구동되는 풀리와 타이밍벨트를 이용하였고 Y 방향에는 LM 가이드와 볼 스크루(Ball screw) 를 이용하였다. Z 방향으로 작용하는 볼 스크루 가이드의 무게를 보상하기 위해서 와이어와 풀리를 이용하여 카운터웨이트(counter weight)를 장착하였다. 엔드이펙터에는 기존의 저항 운동기구와 비슷한 직경인 28mm 의 바(bar)를 장착하였고 엔드이펙터와 바(bar) 사이에는 포스센서(force sensor)를 장착하였다.(Fig. 1) 제어 알고리즘은 position based

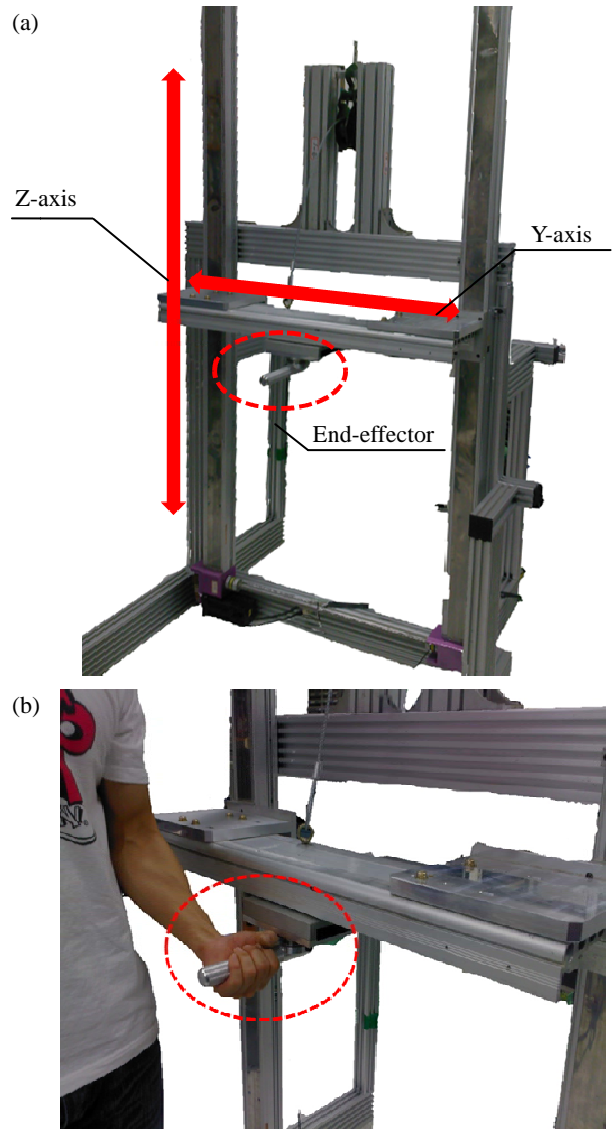


Fig. 1 resistance training simulator : (a) Z-Y axis of resistance training simulator and end-effector (b) End-effector provides resistance to human arm

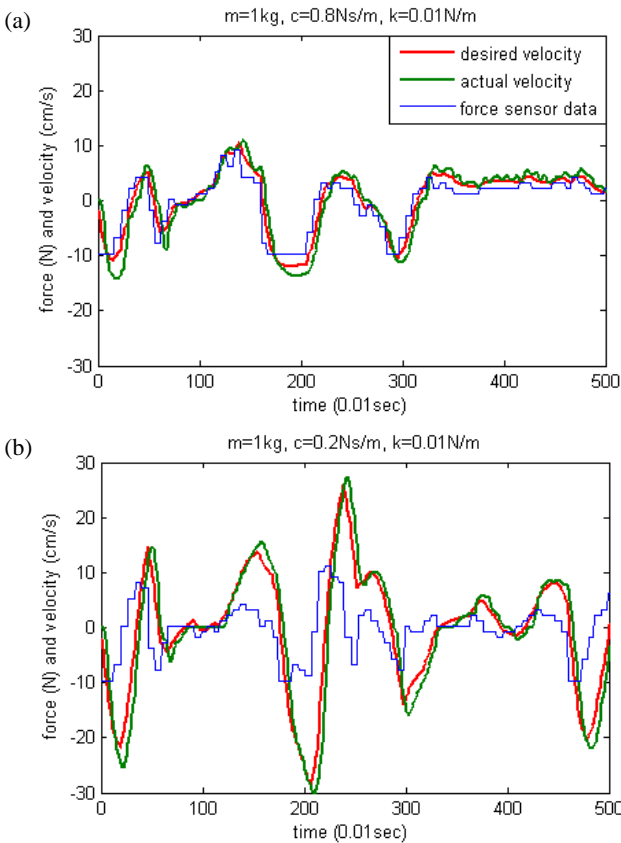


Fig. 2 Plot of time vs. desired velocity, actual velocity and force sensor data : (a)mass  $m=1\text{kg}$ , damper  $c=0.8\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$  and  $k=0.01\text{N}/\text{m}$   
 (b) mass  $m=1\text{kg}$ , damper  $c=0.2\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$  and  $k=0.01\text{N}/\text{m}$

impedance control law[10]를 사용하여 포스 센서의 값에 따른 desired velocity 를 계산하고 시뮬레이터의 입력 값으로 사용하였다. Fig. 2 는 시간에 따른 포스센서에서 측정된 포스 값, desired velocity 그리고 actual velocity 그래프이다. 질량, 댐퍼 그리고 스프링 변수를 조절과 포스센서에서 측정되는 엔드이펙터와 운동자 사이에 작용하는 힘을 측정하여 원하는 저항 값을 운동자에게 전달 할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 2 자유도 저항운동을 할 수 있는 저항운동 시뮬레이터를 제작하고 댐퍼의 변화에 따른 포스센서에서 측정된 값과 그것에 의하여 계산된 desired velocity 그리고 actual velocity 응답을 살펴봄으로써 실시간으로 원하는 저항을 전달 할 수 있음을 확인하였다. 근육의 위치 및 속도에 따른 적절한 저항을 전달 할 수 있을 경우 다음과 같은 연구 이슈(issues)가 있다. 첫째, 기존의 상업 저항운동기구의 경우 운동 중에 저항의 크기와 방향을 변화 할 수 없으며 운동 방법에 관한 연구도 이러한 상업 운동기구를 이용한 것이었으므로 실시간으로 적절한 저항의 크기와 방향을 전달 할 수 있을 경우의 운동 효과 및 건강에 미치는 영향에 대한 검증된 결과가 없다. 현재까지 제안된 실시간으로 저항을 변화 시킬 수 있는 운동기구에 대한 연구는 관절의 위치와 속도에 따른 힘의 변화를 나타내는 Hill surface 를 모델로 하였다. Hill surface 에 따른 운동을 하는 것은 동일한 수준의 운동을 하는데 필요한 시간을 최소화 할 수 있을 뿐 더 나은 운동효과(힘, 파워, 근지구력)의 상승과 건강 개선 효과를 기대할 수 있다는 연구는 진행 된 바 없으며 저항운동 시뮬레이터의 이점을 검증하기 위해서는 실시간 저항의 크기와 방향의 변화에 따라 운동 하였을 경우 근육 및 건강에 미치는 효과에 대한 연구가 필요하다. 둘째, 운동 자세는 부상 및 운동 효과에 중요한 영향을 미치는데[11] 저항운동 시뮬레이터를 이용하여 실시간으로 적

절한 운동 경로를 생성함으로써 부상을 예방하거나 운동 효과를 늘릴 수 있다. 셋째, 기존의 저항운동기구는 세트간 저항을 변화시키는 것이 불편한데 이것은 운동자의 운동욕구나 리듬에 중요한 영향을 미친다. 저항운동 시뮬레이터는 기존의 상업 저항운동기구에 비하여 쉽게 저항을 변화시킬 수 있다. 넷째, 햅틱렌더링(haptic rendering)기술과 연계하여 운동자는 저항운동 시뮬레이터로부터 역감(force feedback)뿐만 아니라 시각 정보를 받아 자세를 교정하거나 운동욕구를 자극 받을 수 있다. 위와 같은 연구 이슈를 통하여 햅틱기반 저항운동 시뮬레이터를 개발할 경우 개인의 목적에 맞는 특정한 운동 효과를 얻을 수 있는 개인 맞춤형 운동기구의 개발이 가능하다.

### 후기

이 논문은 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R11-2007-028-01001-0).

### 참고문헌

- Deschenes, M.R., and Kraemer, W.J., "Performance and physiologic adaptations to resistance training", in Conference on Role of Physical Activity and Exercise Training in Neuromuscular Diseases, pp. S3-S16, San Diego, California, 2001.
- Bird, S.P., Tarpenning, K.M., and Marino, F.E., "Designing resistance training programmes to enhance muscular fitness - a review of the acute programme variables," Sports Medicine, **35**, 841-851, 2005.
- Kraemer, W., Ratamess, N., and French, D., "Resistance training for health and performance," Current Sports Medicine Reports, **1**, 165-171, 2002.
- Morrissey, M.C., Harman, E.A., and Johnson, M.J., "Resistance training modes - specificity and effectiveness," Medicine and Science in Sports and Exercise, **27**, 648-660, 1995.
- Wernbom, M., Augustsson, J., and Thomee, R., "The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans," Sports Medicine, **37**, 225-264, 2007.
- 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.
- Li, P.Y., and Horowitz, R., "Control of smart exercise machines .2. Self-optimizing control," Ieee-Asme Transactions on Mechatronics, **2**, 248-258, 1997.
- 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.
- Deneve, A., Moughamir, S., Afilal, L., and Zaytoon, J., "Control system design of a 3-dof upper limbs rehabilitation robot", in Workshop on Nordic Models of Capitalism, pp. 202-214, Birmingham, ENGLAND, 2004.
- Pelletier, M., Doyon, M., and Ieee, "On the implementation and performance of impedance control on position controlled robots", in 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1228-1233, San Diego, Ca, 1994.
- Mazzetti, S.A., Kraemer, W.J., Volek, J.S., Duncan, N.D., Ratamess, N.A., Gomez, A.L., Newton, R.U., Hakkinen, K., and Fleck, S.J., "The influence of direct supervision of resistance training on strength performance," Medicine and Science in Sports and Exercise, **32**, 1175-1184, 2000.