

## 주관절 굴곡근의 근피로가 힘 재현 감각에 미치는 영향

이원휘, 하성민  
연세대학교 대학원 재활학과

김용욱  
연세대학교 원주의과대학 원주기독병원 재활의학과

오재섭  
연세대학교 대학원 재활학과

### Abstract

#### Influence of Muscle Fatigue on the Sensing of Force Reproduction in Elbow Flexors

**Won-hwee Lee, B.H.Sc., P.T.**

**Sung-min Ha, B.H.Sc., P.T.**

Dept. of Rehabilitation Therapy, The Graduate School, Yonsei University

**Yong-wook Kim, M.Sc., P.T.**

Dept. of Rehabilitation Medicine, Wonju Christian Hospital, Wonju Medical College, Yonsei University

**Jae-seop Oh, M.Sc., P.T.**

Dept. of Rehabilitation Therapy, The Graduate School, Yonsei University

The purpose of this study was to determine the influence of muscle fatigue in elbow flexors on the sense of force reproduction. Fifteen healthy subjects were recruited for this study. Maximum voluntary force (MVF) of elbow flexor muscles was measured by a digital tensiometer. Force errors were measured to test accuracy of the sense of force reproduction in elbow flexors. The subject was required to flex the elbow joint, to maintain and concentrate on about 20% of the MVF target force under visual feedback for 3 seconds. After a 5 second period rest, the subject was asked to duplicate the target force actively. Muscle fatigue was evoked with isometric contraction of the elbow flexors. Isometric contraction was continued until a 50% drop in MVF. The difference, in kilogram between the target force and the reproduced force was calculated for measuring force error. Force errors were compared between the non-fatigued condition and the fatigued condition by the paired t-test. Force errors were significantly increased in the fatigued condition compare to non-fatigued condition. This result suggests that the sense of force reproduction can be disturbed by localized muscle fatigue.

**Key Words:** Elbow flexors; Force reproduction; Muscle fatigue; Proprioception.

### I. 서론

신체의 움직임은 시각, 전정감각 및 고유수용성 감각을 통해 공간에서 사지와 몸통의 움직임, 힘, 압력, 운동 조절에 필요한 정보들이 전달되어 조절된다

(Kavounoudias 등, 2001). 이들 감각 중 고유수용성 감각(proprioception)이란 1906년에 Sherrington에 의해 도입된 용어로 관절의 위치, 움직임, 힘, 무게, 노력(effort), 압력, 진동, 신체의 크기, 모양 등을 인식하는 감각을 뜻한다(Dover와 Powers, 2003; Kavounoudias

등, 2001; Stillman, 2002). 고유수용성 감각은 고유수용성 감각 수용기를 통해 인식되는데, 고유수용성 감각 수용기에는 관절 수용기, 근육 수용기, 피부 수용기가 있다. 그 중 근육 수용기에는 근방추(muscle spindle)와 골지건 기관(golgi tendon organ)이 있고, 이는 근육의 상태에 대한 정보를 제공한다. 근방추는 근육이 신장되었을 때 활성화되고, 골지건 기관은 근육이 수축할 때 주로 활성화되어 근 장력(muscle tension)에 대한 정보를 제공한다(Schmidt와 Lee, 1999). 골지건 기관은 기계적 수용기(mechanoreceptor)로 매우 민감하여, 근육의 작은 힘도 감지하며, 근육의 수축으로 힘이 과도하게 증가하는 경우  $\alpha$ -운동신경을 억제하여 근 장력을 낮춘다.

고유수용성 감각에 영향을 주는 것으로는 근피로(muscle fatigue), 진동, 운동, 외상(trauma), 수술 등이 있다(Allen과 Proske, 2006; Dover와 Powers, 2003). 이 중 근피로는 근 장력을 최대도 유지시킬 수 있는 능력의 손실로 정의되며 장시간 또는 과도한 활동으로 야기되는 불쾌한 느낌 및 능률저하, 그리고 자극에 대한 반응 능력의 상실을 말한다(Doud와 Walsh, 1995; Vollstad, 1997). 또한 정상인들이 최대 힘으로 근 수축을 지속할 때 나타나는 근피로는 근육이 최근의 활동으로 인해 힘을 발생하는 능력이 감소된 상태로 정의된다(Binder-Macleod와 Snyder-Mackler, 1993). 국소적 근피로(localized muscle fatigue)는 반복적인 자극에 의해 근육의 반응이 감소하는 것으로 운동 단위 전위의 크기가 점차 감소해서 나타난다(Kraemer 등, 2000). 근육의 감소된 반응은 여러 요인들의 조합에 의해 유발되는데 첫 번째로, 에너지 저장 능력의 감소, 불충분한 산소, 젖산의 축적 등으로 인한 근 자체의 수축성 기전 장애, 두 번째로, 중추 신경계로부터 억제(inhibitory)영향, 마지막으로, 매우 빠른 연속 섬유의 근 신경 접합부 자극 전도의 감소 등이 있다(Kisner와 Colby, 2002).

고유수용성 감각에 영향을 미치는 근피로는 힘을 추정하는 능력에 혼란을 일으키거나, 근육에 존재하는 기계적 수용기인 골지건 기관의 활성도를 증가시키거나 혹은 근육의 기능을 감소시킨다(Skinner 등, 1986). 팔 근육에 강한 근력 운동을 시킨 후, 세밀한 움직임을 할 때 팔의 움직임이 부자연스러운 느낌을 경험하게 되는데, 이는 강한 근력 운동이 고유수용성 감각의 혼란을 일으켜 힘의 인식, 사지의 움직임 및 인식의 변화를 가져오기 때문이다(Brockett 등, 1997; Gregory 등, 2004). 근피로가 고유수용성 감각에 미치는 영향에 대한 연구

에서는 고유수용성 감각 중에 위치 감각과 힘의 감각이 주로 연구되었다. 위치 감각은 피부, 관절, 근육 수용기 모두에게서 정보를 받으며, 이들 수용기 중 문제가 있으면 위치감각의 오류를 가져오게 된다(Brockett 등, 1997). 주관절 굴곡근에 인위적으로 근피로를 유발하고, 주관절의 위치 추적(tracking) 및 매칭(matching) 검사를 하면 근피로 후 오류가 증가하였다(Allen과 Proske, 2006; Sharpe와 Miles, 1993). 즉 근피로가 관절 위치 감각의 정확도에 영향을 준다는 것을 알 수 있는데, 그 원인에 대해서는 여러 의견이 대립적이다. Walsh 등(2004)은 근방추의 손상을 원인으로 보고했으나, Gregory 등(2002)은 동물 실험에서 근피로가 관절 위치 감각을 방해하지만, 근방추나 건기관의 능력에는 손상을 주지 않는다고 보고하였다. 최근에는 중추에서 보내는 노력(effort)의 정도와 말초, 근방추 등에서 오는 신호 모두가 위치 감각의 공헌을 하여, 이러한 신호들이 근피로에 의해 영향을 받는다고 하였다(Winter 등, 2005).

고유수용성 감각 중에 힘의 감각은 골지건 기관으로 들어오는 감각과 중추에서 보내는 노력의 감각(sense of effort)이 밀접하게 연관되어 힘을 인식한다. 여기서 노력의 감각은 중추에서 중재하는 것으로 운동피질(motor cortex)과 감각피질(sensory cortex)사이 상호 작용으로 생성된다(Walsh 등, 2004). Carson 등(2002)은 큰 힘이 필요할수록 노력의 양이 더욱 많이 요구된다고 보고하였다. 근피로시 근피로 전과 같은 힘을 내기 위해서 중추에서는 노력의 양을 증가시키고, 이는 운동신경의 활성도를 증가시킨다(Brockett 등, 1997). 즉 힘의 감각은 골지건 기관에서 받는 정보 뿐 아니라, 중추에서 내려오는 정보와 함께 통합되어 생성된다.

근피로가 고유수용성 감각에 미치는 영향에 대해 알아본 선행 연구들은 대부분 근육의 원심성 수축을 통해 근피로를 일으켰는데, 이는 근피로와 함께 근섬유의 손상과 지연성 근육통을 유발시켰다. 그래서 대부분의 연구는 지연성 근육통이 끝나는 시점까지 연구하였고, 근피로와 함께 지연성 근육통이 고유수용성 감각에 미치는 영향을 연구하였다. 그러므로 순수하게 근피로가 고유수용성 감각에 미치는 영향에 대한 연구는 많지 않았고, 단시간에 근 피로를 유발하여 힘 재현 감각을 검사하는 연구는 거의 없었다. 또한 대부분의 연구에서는 주관절 굴곡근의 힘 재현이나 매칭검사를 근 피로를 유발하지 않은 사지를 이용해 측정 하는 방법이었다.

따라서 본 실험에서는 등척성 수축을 통해 단시간

내 근피로만을 유발하고, 근 피로를 유발한 사지를 이용하여 힘 재현 감각검사를 했을 때, 근피로가 힘 재현 감각에 어떠한 영향을 주는지 알아보려고 실시하였다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상자

실험 전에 본 연구의 목적과 방법에 대한 충분히 설명을 듣고 실험 참여에 자발적인 동의를 한 연세대학교 원주캠퍼스에 재학 중인 건강한 성인 남자 15명을 대상으로 실시하였다. 대상자 중 상지에 신경계와 근골격계 손상 및 질환이나 선천적인 기형이 있는 자, 지난 6개월 동안 상지의 외상 및 통증을 경험하거나 정기적으로 근력운동을 했던 대상자는 제외시켰다.

연구대상자의 평균 연령은 24.5세였고, 평균 신장은 174.4 cm, 평균 체중은 71.1 kg이었다(표 1).

표 1. 연구대상자의 일반적 특성 (N=15)

일반적 특징	평균±표준편차	범위
나이(세)	24.5±3.3	21~29
키(cm)	174.4±5.9	165~186
체중(kg)	71.1±3.7	65~78

### 2. 실험 기기

주관절 굴곡근의 최대 힘 측정 및 힘 재현 감각의 오류를 측정하기 위해서 디지털 장력계(digital tensiometer)인 TSD121C<sup>1)</sup>를 이용하여 kg 단위로 측정하였다. TSD121C를 통하여 측정된 아날로그 신호는 MP100WSW<sup>1)</sup>으로 보내져 디지털 신호로 변환한 후 Acqknowledge 3.72 소프트웨어(BIOPAC System Inc., CA, U.S.A)를 이용하여 자료를 수집하였다. 측정하기 전에 보정(calibration)을 실시하였다.

### 3. 실험 방법

#### 가. 최대 힘(MVF) 측정

대상자는 주관절 굴곡근의 최대 힘(maximal voluntary force; MVF)을 측정하기 위해서 등반이가 있는 의자에 앉아 몸을 벨트로 고정하고, 주관절을 90도 굴곡하고 아래팔은 회외한 자세에서 장력계를 최대 힘으

로 당기도록 하였다. 주관절 굴곡근의 등척성 최대 힘을 5초간 실시하였고, kg 단위로 측정하였다(그림 1).

#### 나. 목표 힘(target force) 설정

최대 힘의 20%를 kg 단위로 계산하여 20%의 ±0.05 kg을 오차 한계 범위로 하여 목표 힘(target force)을 설정하였다.

#### 다. 실험 설계

목표 힘을 설정 한 후 대상자는 5회 연습을 통해 최대 힘의 20% 힘을 인식하도록 하였다. 이 때 컴퓨터 모니터를 통해 현재 힘의 수치를 보여주어 시각적 피드백을 제공하였다. 연습 후 10분간의 휴식시간을 주어 연습과 실험 사이에 대상자의 학습효과(learning effect)나 이월효과(carry-over effect)를 최소화하였다. 또한 실험 순서에 의한 학습효과나 이월효과 등을 방지하기 위해서 실험 순서는 무작위로 결정하였고, 근피로 유발 전 힘 재현 감각 검사와 근피로 유발 후 힘 재현 감각 검사 사이에는 1시간의 휴식시간을 제공하였다.

1) 실험 1. 근피로 없이 힘 재현 감각 검사 시 오류 측정  
시각적 피드백을 위한 컴퓨터 모니터를 주시하면서 최대 힘의 20% 힘으로 주관절 굴곡근을 3초간 등척성 수축 한 후 3초간의 평균값을 측정하였다. 대상자에게 20%의 힘을 유지하면서 목표 힘을 인지하도록 하였고, 5초 후에 시각적 피드백을 차단하고 다시 등척성 수축 하여 인지했던 목표 힘만큼 재현하도록 하였다. 대상자가 목표 힘을 재현하였다고 보고하면 3초간의 힘을 측정하였다. 이를 두 번씩 하여 시각적 피드백을 제공했을 때의 힘과의 오류를 측정하였다.

2) 실험 2. 근피로 후 힘 재현 감각 검사 시 오류 측정  
근피로를 유발하기 위하여 완전히 근육을 이완시킨 후 주관절 굴곡근의 등척성 수축을 통해 최대 근력의 50% 이상의 힘을 계속 유지하도록 하였다. 더 이상 50%의 힘을 내지 못하는 순간부터 근피로 시기로 결정하였다.

실험 1과 같이 우선 시각적 피드백이 제공된 상태에서 최대 힘의 20% 힘으로 주관절 굴곡근을 3초간 등척성 수축 한 후 3초간의 평균값을 측정하였다. 5초 후에 시각적 피드백을 차단하고 다시 등척성 수축하여 인지했던 목표 힘을 재현하였다. 대상자가 목표 힘을 재현

1) BIOPAC System Inc., CA, U.S.A.



그림 1. 최대 힘 측정 및 힘 재현 감각 검사 자세.

하였다고 보고하면 3초간의 힘을 측정하였고, 이를 두 번씩 하여 시각적 피드백을 제공하였을 때의 힘과의 오류를 측정하였다.

#### 4. 분석방법

근피로 전과 후의 힘 재현 감각 검사를 하였을 때 오류에 차이가 있는지 알아보기 위해 짝 비교 t-검정(paired t-test)을 실시하였다. 통계학적 유의수준을 검정하기 위하여  $\alpha=.05$ 로 하였으며 자료의 통계처리를 위해 상용 통계프로그램인 윈도우용 SPSS version 12.0을 사용하였다.

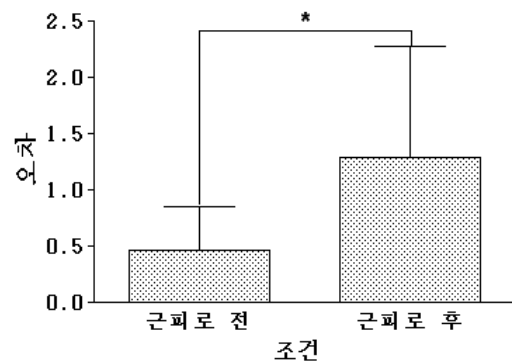
### III. 결과

#### 1. 근피로 전과 후의 힘 재현(force reproduction) 감각 검사 시 오류 비교

주관절 굴곡근의 최대 힘 측정 및 힘 재현(force reproduction) 감각 검사를 하기 위해서 디지털 장력계(digital tensiometer)인 TSD121C를 이용하여 kg 단위로 측정하였다. 근피로 전후의 힘 재현 감각 검사에서 오류는 근피로 후에 유의하게 증가하였다( $p<.05$ ). 근피로를 일으키기 전 힘 재현 시 오류는 평균 .4613 kg이었으나, 근 피로를 일으킨 후 오류는 평균 1.288 kg으로 증가하였다(표 2)(그림 2).

표 2. 근피로 전, 후의 힘 재현 감각 검사 시 오류 비교  
단위: kg

	평균±표준편차	t	df	p
근피로 전	.4613±.3872	-3.976	14	.001
근피로 후	1.2880±.9901			



\* $p<.05$

그림 2. 근피로 전, 후의 힘 재현 감각 검사 시 오류.

### IV. 고찰

본 연구는 등척성 수축으로 단시간 내 근피로를 유발하였을 때 근피로가 힘 재현 감각에 어떠한 영향을 주는지 알아보고자 실시하였다. Weerakkody 등(2003)은 근피로시 근육이 내는 힘은 감소되므로, 힘 매칭 과제를 하였을 때 오류는 증가한다고 하였고, 근피로 직후 힘 매칭 과제를 수행하면 오류는 더 증가한다고 보고하였다. Proske 등(2004)은 주관절 굴곡근의 원심성 수축으로 근피로를 유발시킨 후 바로 최대 힘의 30%를 목표 힘으로 하여 힘 매칭 과제 수행시 목표 힘보다 14%가 증가하는 오류를 보였다. 또한 Dover와 Powers(2003)도 어깨의 내회전 근과 외회전 근으로 힘 재현 감각을 검사했을 때 목표 힘보다 내회전은  $10.5\pm 8.2$  Nm, 외회전은  $8.4\pm 5.3$  Nm이 증가하는 오류를 보였다. 본 실험에서도, 근피로를 유발시킨 후 바로 힘 재현 검사를 실시하였고 근피로 전에 힘 재현 감각을

검사했을 때 평균 오류는 .4613 kg, 근피로 후 평균 오류는 1.288 kg으로 근피로 이후 힘 재현 감각을 검사했을 때 오류가 유의하게 증가했다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 오류가 증가하는 원인은 몇 가지의 기전으로 설명되어질 수 있다. 첫 번째는 근육은 근피로로 인해 휴식시의 근 장력(tension)이 증가되어, 골지건 기관이 민감해 진다(Allen과 Proske, 2006). 두 번째는 근피로로 근섬유의 손상과 함께 근방추가 손상 되어 힘을 재현하는 감각을 방해한다(Brockett 등, 1997). 세 번째는 근피로를 유발하기 위한 등척성 운동이 근육의 온도를 상승시켜, 근방추와 골지건 기관에 영향을 준다(Mense, 1978). 이는 온도가 올라가면서 Ia 구심성 감각 섬유와 골지건 기관이 활성화되고, 대부분의 이차 감각 종말(secondary ending)의 활성화(firing)는 감소하거나, 멈춘다. 그러므로 관절 주위의 근피로가 관절의 고유수용성 근육 피로된 체계를 방해한다. 네 번째는 실험 대상자가 목표가 되는 힘의 수준을 인식할 때 이를 말초에서 오는 힘의 감각에 의존하기 보다는 중추에서 근육으로 직접 명령을 내리는 노력의 감각(sense of effort), 즉 어느 정도 힘을 내야 한다는 감각을 통해서 힘의 수준을 인식하므로 오류가 증가한다(Thompson 등, 1990). 힘의 수준에 대한 인식은 중추 신경계와 외부의 감각이 끊임없는 조정을 통해서 일어난다. 즉, 말초에서 들어가는 고유수용성 감각과 중추에서 내려오는 노력의 감각이 계속적인 수정을 통해서 힘을 인식하게 된다. 하지만, 근피로로 인해 골지건 기관이나 근방추에서 들어오는 고유수용성 감각이 부정확해지고, 중추에서 내려오는 명령의 양이 증가되어, 중추 신경계에서 내려오는 노력의 감각을 통해 힘을 인식하게 된다(Gandevia, 2001). 다섯 번째는 근피로 후 힘 재현 과제를 함으로 중추의 흥분성이 증가하여 같은 힘을 재현해야 하는데도 더 큰 힘을 내어 오류를 유발한다(Carson 등, 2002; Proske 등, 2004). 또한 근피로는 근육이 힘을 내는 능력을 감소시키므로, 크기가 큰 운동단위들을 먼저 동원하게 된다. 즉, 근피로 후 주어진 목표의 힘을 재현하기 위해 근피로 전의 힘과 동일한 힘을 내면 목표 힘에 도달하지 못하게 되어, 좀 더 크기가 큰 운동단위를 동원하여 힘 재현 검사시 목표 힘보다 더 큰 힘을 내는 오차를 유발한다(Weerakkody 등, 2003). 그러므로 근피로는 근방추, 골지건 기관의 변화 뿐만 아니라, 중추에서 내려오는 노력의 감각의 양이 변화함으로 힘 재현 감각 검사 시 오류를 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 단시간의 근피로가 고유수용성 감각들에 힘의 감각에 영향을 주는지에 대해 힘 재현 감각 검사를 통해 알아보았다. 근피로는 힘의 인식에 유의한 영향을 주어 힘을 재현시 오류를 증가시키며, 올바른 몸의 정보를 얻지 못하고, 움직임의 정확히 조절하는 능력을 감소시킨다. 그러므로 단시간 무리한 반복적인 작업으로 근피로가 유발되었을 때 고유수용성 감각의 오류가 증가하며 이에 따라 관절이나 근육에 더 많은 스트레스가 부가 될 수 있다. 또한 다발성 경화증 환자와 같이 피로가 쉽게 유발되는 환자에게 과도한 재활 운동은 근피로로 인한 고유수용성 감각 저하가 운동 수행능력 또는 균형 등에 영향을 주어 재손상 및 낙상(falling)의 위험을 제공할 수 있으므로 주의해야 한다(Kwon 등, 1998).

본 연구는 한쪽 팔에 반복측정 방법으로 연구를 수행 하였을 때 나타나는 문제점인 학습효과(learning effect)와 누적효과(cumulative effect)를 완전히 배제하지 못한 제한점을 가지고 있다. 지금까지는 근피로와 힘 매칭 과제 수행시 오류에 대한 연구가 주관절이나 견관절, 그리고 무릎관절에 국한되어 있었다. 앞으로는 주관절 뿐만 아니라 다른 관절들인 허리, 손목 관절 등에 대한 연구도 필요할 것이다. 또한 대부분의 연구에서는 정상인을 대상으로 힘 매칭 및 재현 감각 검사를 수행 하였는데, 실제로 근피로가 잘 일어나는 환자들을 대상으로 했을 때에도 힘 재현 감각에 변화가 있는지 알아보는 연구도 필요할 것이다.

## V. 결론

본 연구는 주관절 굴곡근을 등척성 수축을 통해 단시간 내 근피로만을 유발하여 근피로를 유발한 팔로 힘 재현 감각 검사를 하였을 때 근피로가 힘의 감각에 영향을 주는지 알아보려고 실시하였다. 연구대상자는 건강한 성인 남자 15명을 대상으로 실시하였으며 최대 힘 및 힘 재현 감각 검사를 디지털 장력계(digital tensiometer)를 사용하여 측정하였다. 연구결과는 대상자들에게서 근피로 전후의 힘 재현 감각 검사 시 근피로 후의 오류가 근피로 전보다 유의하게 증가하였다( $p < .05$ ). 근피로는 힘 재현 감각 검사 시 나타나는 오류를 증가시키고, 이는 근피로가 힘의 인식을 방해 한다는 것을 확인할 수 있었다. 근피로는 고유수용성 감각에 영향을 주고, 이는 사지의 움직임을 정확히 조절할 수 없어, 근

육이나 관절에 가해지는 스트레스 부하에 영향을 줄 것이다. 앞으로 근피로가 힘 재현 능력을 감소시키는 기전에 대한 더 많은 연구가 필요할 것이고, 주관절이 아닌 다른 관절에 대한 연구 및 실제 근피로가 있는 환자를 대상으로 한 연구도 필요할 것이다.

## 인용문헌

- Allen TJ, Proske U. Effect of muscle fatigue on the sense of limb position and movement. *Exp Brain Res.* 2006;170:30-38.
- Binder-Macleod SA, Snyder-Mackler L. Muscle fatigue: Clinical implications for fatigue assessment and neuromuscular electrical stimulation. *Phys Ther.* 1993;73:902-910.
- Brockett C, Warren N, Gregory JE, et al. A comparison of the effects of concentric versus eccentric exercise on force and position sense at the human elbow joint. *Brain Res.* 1997;771:251-258.
- Carson RG, Riek S, Shahbazzpour N. Central and peripheral mediation of human force sensation following eccentric or concentric contractions. *J Physiol.* 2002;539:913-925.
- Doud JR, Walsh JM. Muscle fatigue and muscle length interaction: Effect on the EMG frequency components. *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 1995;35(6):331-339.
- Dover G, Powers ME. Reliability of joint position sense and force-reproduction measures during internal and external rotation of the shoulder. *J Athl Train.* 2003;38(4):304-310.
- Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev.* 2001;81:1725-1789.
- Gregory JE, Brockett CL, Morgan DL, et al. Effect of eccentric muscle contraction on Golgi tendon organ response to passive and active tension in the cat. *J Physiol.* 2002;538:209-218.
- Gregory JE, Morgan DL, Proske U. Response of muscle spindles following a series of eccentric contractions. *Exp Brain Res.* 2004;157:234-240.
- Kavounoudias A, Roll R, Roll JP. Foot sole and ankle muscle inputs contribute jointly to human erect posture regulation. *J Physiol.* 2001;532(3):869-878.
- Kisner C, Colby AC. *Therapeutic exercises: Foundation and techniques.* 4th ed. Philadelphia, F.A. Davis co., 2002:63-64.
- Kraemer WJ, Ratamess N, Fry AC, et al. Influence of resistance training volume and periodization on physiological and performance adaptations in collegiate women tennis players. *Am J Sports Med.* 2000;28:626-33.
- Kwon OY, Choi HS, Yi CH, et al. The effects of knee and ankle muscles surrounding the knee and ankle joints on one leg static standing balance. *J Phys Ther Sci.* 1998;10:7-12.
- Mense S. Effects of temperature on the discharges of muscle spindles and tendon organs. *Pflugers Arch.* 1978;374:159-166.
- Proske U, Gregory JE, Morgan DL, et al. Force matching errors following eccentric exercise. *Hum Mov Sci.* 2004;23:365-378.
- Schmidt RA, Lee T. *Motor Control and Learning: A behavioral emphasis.* 4th ed. Illinois Champaign, Human Kinetics, 1999:143-144.
- Sharpe MH, Miles TS. Position sense at the elbow after fatiguing contraction. *Exp Brain Res.* 1993;94:179-182.
- Skinner HB, Wyatt MP, Hodgdon JA, et al. Effect of fatigue on joint position sense of the knee. *J Orthop Res.* 1986;4:112-118.
- Stillman BC. Making sense of proprioception: The meaning of proprioception, kinaesthesia and related terms. *Physiotherapy.* 2002;88(11):667-676.
- Thompson S, Gregory JE, Proske U. Errors in force estimation can be explained by tendon organ desensitization. *Exp Brain Res.* 1990;79(2):365-372.
- Vollestad NK. Measurement of human muscle fatigue. *J Neurosci Methods.* 1997;74:219-227.
- Walsh LD, Hesse CW, Morgan DL, et al. Human forearm position sense after fatigue of elbow flexor muscles. *J Physiol.* 2004;558:705-715.
- Weerakkody N, Percival P, Morgan DL, et al.

Matching different levels of isometric torque in  
elbow flexor muscles after eccentric exercise.  
Exp Brain Res. 2003;149:141-150.

Winter J, Allen TJ, Proske U. Muscle spindle signals  
combine with the sense of effort to indicate  
limb position. J Physiol. 2005;568:1035-1046.

---

---

논문접수일            2007년 4월 1일

논문게재승인일        2007년 7월 10일