

기능적 자기공명영상을 이용한 구심성 및 원심성 근 수축에 따른 뇌 활성화 분석

The Journal Korean Society of Physical Therapy



■ 김중선, 김중휘¹, 박민규², 박지원³

■ 대구대학교 재활과학대학 물리치료학과, ¹강병원 물리치료실, ²영남이공대학 기계·자동차학부, ³대구가톨릭대학교 보건과학대학 물리치료학과

Comparison of Cortical Activation between Concentric and Eccentric Exercise: A Pilot fMRI Study

Chung-Sun Kim, PT, PhD; Joong-Hwi Kim, PT, PhD¹; Min-Kyu Park, PhD²; Ji-Won Park, PT, PhD³

Department of Physical Therapy, College of Rehabilitation Science, Daegu University; ¹Department of Physical Therapy, Kang Hospital; ²School of Mechanical and Automotive engineering Technology, Yeungnam College of Science and Technology; ³Department of Physical Therapy, College of Health Science, Catholic University at Daegu

Purpose: Behavior and movement are accomplished by voluntary contractions of skeletal muscles. There are three types of muscle contractions: concentric, isometric and eccentric. The aim of our study was to determine whether there is a difference in the cortical activation pattern between concentric contraction and eccentric contraction of the wrist extensor muscle.

Methods: Four healthy right-handed volunteers without any previous history of physical or neurological illness were recruited. fMRI scanning was done during 4 repeated blocks of concentric and eccentric exercise of the wrist joint. Subjects exercised for 12 seconds and then rested for 12 seconds before beginning the second set of exercises. To determine the excitability of cortical neurons during exercise, voxel count and intensity index were analyzed.

Results: For right hand movements, when concentric contractions of the right wrist were done, only the left primary motor area was activated. In contrast, during eccentric contraction, both the primary motor area and secondary motor area were activated. For left hand movements, both concentric and eccentric contractions induced only the supplementary motor cortex and the contralateral primary motor cortex.

Conclusion: During eccentric contractions, both the primary motor area and secondary motor area are activated in ipsilateral and contralateral brain areas. Thus, eccentric contractions require more complex and difficult movements than concentric contractions do.

Keywords: Concentric exercise, Eccentric exercise, Cortical activation, fMRI

논문접수일: 2010년 2월 8일

수정접수일: 2010년 3월 18일

게재승인일: 2010년 3월 21일

교신저자: 박지원, mylovept@hanmail.net

1. 서론

신체의 모든 움직임은 골격근의 수의적인 수축을 통하여 이루어지며, 근수축은 작용하는 근육의 길이가 길어지는 원심성 수축(eccentric contraction)과 근육의 길이가 짧아지는 구심성 수축(concentric contraction), 근수축은 발생하지만 길이의 변화

가 없는 등척성 수축(isometric contraction) 등으로 구분하고 있다. 이 중에서 원심성 수축은 수축하는 근육이 외력에 대항하는 힘으로서 작용하는 경우에 발생하며, 의자에 앉을 때의 대퇴사두근의 수축, 턱걸이에서 올라갔다 내려올 때의 상완이두근의 수축, 높이 뛰기 전 반동을 주기 위한 가자미근과 넙치근의 수축 등과 같이 일상생활의 모든 활동에서 중요하게 작용한

다.¹⁻³ 또한, 원심성 수축은 치료적 중재로서 물리치료 및 스포츠 의학에서 치료적 중재로서 많이 이용되고 있으며, 운동 선수 트레이닝, 노인 운동, 레크리에이션 활동 등과 같은 다양한 운동 프로그램의 구성 요소로서 중요한 역할을 하고 있다.

원심성 수축은 운동역학적, 운동생리학적 측면에서 구심성 수축과는 다른 특성을 보이며, 이와 관련된 많은 연구들이 진행되어 왔다. 일반적으로 원심성 수축은 동일한 힘의 크기와 속도로 수축하였을 때 구심성 수축과 비교하여 더 적은 뉴런이 활성화된다고 하며, 동일한 에너지를 소모하는 조건 하에서 구심성 수축보다 더 큰 장력을 생산하기 때문에 에너지 소모의 효율적인 측면에서 유리하다고 보고되어 왔다.⁴⁻⁸ 또한 적절한 원심성 수축 운동은 신경근 적응에 대한 변화를 가져와 통증과 조직의 손상을 줄인다고 알려져 있으며, 치료적 중재 과정에서도 구심성 수축 운동에 비해 더 빠른 운동 회복력을 보여왔다.⁹⁻¹¹ 이와 같이 원심성 수축에 대한 에너지 효율성 및 기능적 용량에 관한 운동생리학적 연구는 현재에도 많은 연구자들의 관심을 갖고 있는 부분이다.

최근의 연구에서는 뇌파(electroencephalogram, EEG), movement-related cortical potentiation(MRCP), 경두개자극(Transcranial magnetic stimulation, TMS), 근전도(electromyography, EMG) 등의 다양한 장비를 이용하여 신경생리학적 측면에서 원심성 수축과 구심성 수축의 차이점에 대한 보다 향상된 연구가 진행되고 있다. 신경생리학적 측면에서 가장 많이 보고되고 있는 것 중 하나는 원심성 수축과 구심성 수축은 근 활성화도의 차이를 보인다는 것이며, 같은 크기의 힘을 주었을 때 원심성 수축이 구심성 수축보다 더 적은 근 활성도를 나타낸다고 한다.¹² 또한, 원심성 수축은 구심성 수축에 비해 뇌신경 사이의 전기적 흐름이 더 적은 것으로 나타났으며, 동원되는 운동 단위의 수가 작고 선택적이어서 근 수축이 먼저 일어나는 것으로 보고되고 있다.^{13,14}

원심성 수축과 구심성 수축에 대한 신경생리학적 작용의 차이점을 나타내는 것은 중추 신경계의 조절 메커니즘에서 차이가 있으며, 대뇌피질의 활성화 영역에서도 차이가 나타날 것이다.¹⁵ 최근 뇌신경 과학의 발전을 토대로 대뇌피질이 활성화되는 양상의 변화를 측정할 수 있는 기능적 자기공명 영상 기법을 통한 뇌 지도화 연구가 많이 진행되고 있다.¹⁶⁻¹⁹

기능적 자기공명 영상 기법을 통한 원심성 수축과 구심성 수축 시 뇌 활성화도에 대한 차이를 신경학적 측면에서 뇌의 기능적인 변화를 알아보는 것은 기초 과학적으로나 임상적인 자료로서 중요한 의미를 가지며, 대뇌피질의 활성화 영역을 비교하는 것은 신경학적 조절에 관한 메커니즘을 밝히는 데 큰 의의가 있다고 할 수 있겠다. 또한, 원심성 수축과 구심성 수축간의 운동역학적, 운동생리학적 관계 및 이에 대한 메커니즘을 알

아보는 연구는 많이 진행되고 있으나 기능적 자기공명 영상 기법을 통한 신경학적 뇌 활성화도에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기능적 자기공명 영상 기법을 이용하여 골격근이 수의적인 원심성 수축과 구심성 수축을 할 때 각각의 방법에서 나타나는 뇌 활성도를 규명하여 그 차이를 비교하고자 하였다.

11. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 근수축과 관련된 과거의 신경외과학적 제한이나 정형외과학적 제한이 없으며, 운동 수행과 관련된 인지적, 정신적 이상 소견이 없는 오른손이 우성인 건강한 3명의 정상 성인을 대상으로 하였다. 모든 대상자는 Modified Edinburgh Inventory²⁰ (mean: +95.2, range: 70~100)를 통하여 오른손이 우성임인 확인하였으며, 본 연구의 목적과 실험의 절차에 대하여 충분히 이해하였고, 자발적인 동의 하에 연구에 참여하였다.

2. 실험방법

1) 운동과제의 수행

운동 수행은 fMRI scanner 안에서 두부와 체간이 고정된 자세로 실시하였다. 운동 수행은 오른쪽, 왼쪽 손목 신전근의 구심성 수축과 원심성 수축 운동을 각각 실시하였으며, 총 4회 반복 측정을 시행하였다. 운동 수행의 한 주기는 시작 전 준비 구간 3초, 구심성 운동 구간 12초, 휴식 구간 12초, 원심성 운동 구간 12초로 구성하였으며, 손목 신전근의 구심성 운동과 원심성 운동 시 손목 외의 대상작용을 방지하기 위하여 상완을 스트랩으로 체간 옆에 고정시켰다. 구심성 수축 운동을 하기 전의 준비 자세는 손과 손목의 편안한 상태를 유지한 채 손바닥이 바닥에 닿은 자세를 취하도록 하였으며, 준비기간 3초 후, 손목 신전근의 구심성 수축 운동 구간에서 2초에 한 번씩 최대한 빠른 속도로 수축하도록 손목의 신전을 유발하였으며, 총 6회 반복하였다. 휴식 구간 이후 시행되는 원심성 수축 운동의 시작 자세는 구심성 수축 운동과 같은 자세에서 손목만 90° 신전한 자세를 유지한 채 시행하도록 하였으며, 원심성 수축 운동 구간에서 '시작'이라는 구두 신호와 함께 6초 동안 같은 속도를 유지하면서 손목의 굴곡이 일어나게 원심성 수축을 유발시켰으며, 총 2회 반복하였다. 각 그룹의 시작 전 자세는 운동 수행에 맞게 같은 자세를 취하도록 하였다.

2) fMRI 촬영

대상자는 MRI scanner 안에서 바로 누운 자세로 오른쪽 손목

의 구심성 수축 운동과 원심성 수축 운동을 수행하는 동안 체간의 움직임을 없애기 위해 vacuum beandage pillows (Olympic Medical, 미국)로 머리와 목, 어깨, 팔을 수평면 상에 고정시켰다. 손목의 굴곡과 신전 운동은 수직선상에서 위, 아래로 수행되었으며, MRI 촬영 동안 이를 제외하고 발생하는 모든 움직임을 통제하였다. 운동 수행에 영향을 미치는 시각적 피드백은 종이를 통하여 제거하였으며, 대상자의 운동 수행을 잘 유지하기 위하여 탁구공만한 크기의 종이로 만든 공을 제공하여 손과 손가락으로 쥐게 하였다. 각각의 운동 수행 동안 촬영실 밖에서는 대상자의 운동 수행 및 자세를 촬영실 내 비디오 카메라를 통하여 관찰하였으며, 표시된 화면을 통하여 상태를 확인하였다.

3. 자료분석

본 실험을 통하여 얻어진 자료는 MATLAB(Mathworks Inc. 미국) 환경에서 구현되는 SPM 8(Statistical Parametric Mapping 8 version, Wellcome Department of Cognitive Neurology, 영국) software로 분석하였다. 모든 fMRI 자료를 재배열(realign)하였으며, mean-image와 EPI 영상은 상관정렬(coregister) 하였으며, 이어서 EPI 영상과 T1 영상을 T1 template에 맞추는 공간표준화(normalize) 작업을 하였다. 표준화된 영상은 8mm의 FWHM(full width of half maximum)을 갖는 Gaussian kernel filter를 적용하여 편평화(smoothing) 하였다. 이렇게 처리된 결과를 바탕으로 BOLD(Blood oxygen level dependent) 신호의 변화를 얻기 위하여 실험조건과 비교조건을 감산(subtraction)하였으며, 분석에서 실험조건은 구심성 수축운동 과제, 원심성 수축운동 과제 구획(수행기)으로 하였고, 비교조건은 대조과제(휴식기) 구획으로 하였다. 조건 간의 비교 시에는 반복제시에 따른 과제 효과와 혈액역반응함수(hemodynamic response function: hrf)에 대한 선형모델을 적용하였으며, 이렇게 구성된 모델과 영상 처리된 결과는 ANOVA를 이용하여 통계 분석하였다. 관심영역은 일차감각운동피질(primary sensory-motor cortex, SMI1), 전운동영역(premotor area), 보조운동영역(supplementary motor area, SMA), 전두엽(frontal lobe), 두정엽(parietal lobe)으로 설정하였다. 본 연구의 결과 분석은 고정효과모델(fixed effect model)을 이용하여 통계 역치를 부피소 수준에서 정하였으며, 높이역치(height threshold)를 corrected p 값이 0.05보다 낮은 수준에서, 범위역치(extent threshold)는 부피소 5개를 기준으로 활성 지도를 얻었다. 이는 생리학적으로 유의미한 결과를 적어도 유의미한 부피소가 5개 이상 있을 경우 활성이 된 것으로 가정하고 통계적 유의성을 검증한 것으로, 각 활성의 p 값은 부피소의 높이역치와 범위역치의 상호작용에 의하여 계산하였다.

III. 결과

기능적 자기공명 영상을 분석한 결과, 오른손으로 구심성 수축 운동을 수행하였을 때에는 왼쪽의 일차운동영역(primary motor area, PMA)에서만 활성도가 나타난 반면, 원심성 수축 시에는 왼쪽, 오른쪽 모두 일차운동영역의 활성화와 함께 보조운동영역에서도 활성도가 나타났다(Figure 1). 반면, 왼손에서는 구심성 수축 운동과 원심성 수축 운동하였을 때 모두 오른쪽의 일차운동영역에서만 활성도가 나타났다.

또한 일차운동영역에서의 활성화된 부피소와 좌표 값은(x좌표값, y좌표값, z좌표값) 오른손의 구심성 수축 운동 시 각각 대상자 1은 부피소 448, 좌표값 $-50 \cdot -26 \cdot 52$ 였고, 대상자 2는 1652, $-20 \cdot -10 \cdot 74$ 이었고, 대상자 3은 589, $-30 \cdot -22 \cdot 72$ 였다. 반면, 원심성 수축 운동 시 대상자 1은 293, $-36 \cdot -46 \cdot 70$ 이었고, 대상자 2는 933, $-36 \cdot -28 \cdot 64$ 였으며, 대상자 3은 204, $-28 \cdot -12 \cdot 74$ 였다. 왼손의 구심성 수축 운동 시 부피소와 좌표 값은 대상자1에서 1091, $34 \cdot -14 \cdot 74$ 이었고, 대상자 2는 1179, $30 \cdot -22 \cdot 68$ 이었고, 대상자3은 2783, $40 \cdot -24 \cdot 62$ 였다. 반면, 왼손의 원심성 수축 운동 시 대상자 1은 269, $34 \cdot -18 \cdot 60$ 이었고, 대상자 2는 670, $40 \cdot -2 \cdot 60$ 이었고, 대상자 3은 2652, $44 \cdot -22 \cdot 52$ 로 나타났다.

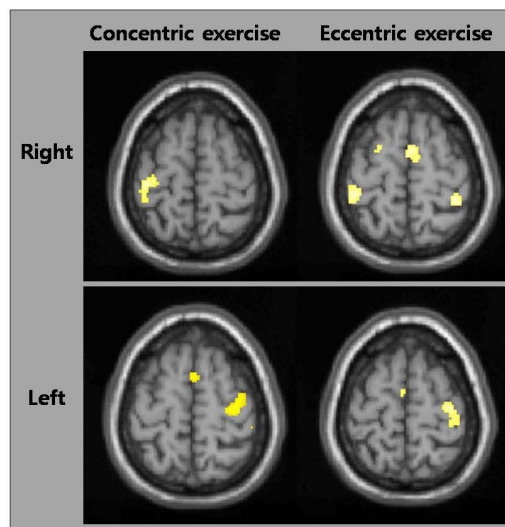


Figure 1. The representative fMRI results showing cortical activation during concentric and eccentric exercise in the right and left hand.

Table 1. Regions of significant BOLD signal during concentric and eccentric exercise in all subjects.

Subject Number	Concentric exercise			Eccentric exercise			
	Voxel	T value	Talairach coordinate	Voxel	T value	Talairach coordinate	
Rt.	1	448	7.79	-50,-26,52	293	7.16	-36,-46,70
	2	1652	13.55	-20,-10,74	933	8.32	-36,-28,64
	3	589	8.80	-30,-22,72	204	7.03	-28,-12,74
Lt.	1	1091	10.56	34,-14,74	269	6.36	34,-18,60
	2	1179	9.41	30,-22,68	670	6.26	40,-2,60
	3	2783	15.19	40,-24,62	2652	14.75	44,-22,52

BOLD: Blood oxygen level dependent

IV. 고찰

본 연구는 기능적 자기공명 영상 기법을 이용하여 손목의 신전에서 구심성 수축과 원심성 수축 사이의 운동 수행에 따른 차이점이 나타나는지를 알아보고자 하였다. 운동 수행에 있어 근육의 원심성 수축과 구심성 수축은 인간의 행동과 움직임을 위한 필수적인 요소이며, 기능적 자기공명 영상 기법은 뇌 혈류량의 미세한 변화를 감지할 수 있는 시공간적 해상도가 우수한 측정 도구로써 운동학습, 뇌 손상후의 재조직화, 언어의 발달, 심리 및 인지 기능 등의 다양한 분야에서 인간의 뇌의 활성도를 측정하는데 많이 사용되고 있다.²¹ 우리는 이러한 기능적 자기공명 영상을 통하여 손목 신전근의 구심성 수축 운동과 원심성 수축 운동을 수행하는 동안 뇌 활성도의 차이를 알아보았다. 기능적 자기공명 영상에서 오른손의 구심성 운동 시에는 왼쪽 일차운동영역에서만 활성도가 나타난 반면 원심성 수축운동에서는 왼쪽 오른쪽 모두 일차운동영역에서 활성도가 나타났다. 또한 왼손으로 운동 수행을 하였을 때에는 구심성 수축과 원심성 수축 모두 오른쪽의 일차운동영역에서만 활성도가 나타난 결과를 보였다. 원심성 수축과 구심성 수축 사이에서의 뇌 활성도 차이뿐만 아니라 왼손과 오른손의 뇌 활성도가 다르게 나타난 것은 우성 손과 비우성 손의 차이 때문이다.²²

원심성 수축 운동과 구심성 수축 운동시의 차이는 운동역학, 운동생리학 등 여러 분야에서 다양하게 연구되어 왔다. Lacert 등²³은 총 25명의 남자 실험자를 대상으로 각각 5그룹(빠른 구심성 수축 그룹, 느린 구심성 수축 그룹, 느린 원심성 구심성 수축 그룹, 빠른 원심성 구심성 수축 그룹, 대조군 그룹)으로 나누어 대퇴사두근의 구심성 수축 및 원심성 수축 운동을 하였을 때 최대 토크를 비교한 연구에서 최대 토크 값은 원심성 수축운동을 하였을 때 더 크다고 보고하였다.^{24,25} 또한, Tesch 등¹²은 남자 14명을 대상으로 EMG를 이용한 구심성

수축과 원심성 수축의 활성화도 연구에서 같은 간격의 시간을 두고 외측광근(vastus lateralis), 대퇴직근(rectus femoris)의 최대 구심성 수축과 원심성 수축을 실시한 결과 원심성 수축에서 활성화도가 더 높게 나타났으며, 원심성 수축은 시간이 지나도 크기가 감소하지 않았으나 구심성 수축은 시간이 지날수록 값이 감소하는 결과를 보였다고 하였다. 이는 원심성 수축이 구심성 수축에 비해 에너지 소모가 적기 때문이라고 설명하였다.²⁶

이와 같이 구심성 수축 운동과 원심성 수축 운동 사이의 차이점에 관한 연구는 많이 진행되어 왔으며, 이번의 기능적 자기공명 영상을 통한 연구에서도 구심성 수축과 원심성 수축간의 뇌 활성화도에서 차이를 보였다. 오른손이 우성인 사람들만 실험에 참가하고 3명이라는 적은 수의 대상자로 제한하여 결과를 단정짓기는 어려우나 본 연구를 통하여 기능적 자기공명 영상에서 구심성 수축과 원심성 수축 시 다른 활성화도를 나타내는 결과를 보였다. 비록 비우성인 왼손에서는 그 차이가 크게 나타나지 않았으나 우성인 오른손에서는 구심성 수축과 원심성 수축 운동시 엄연히 뇌활성도의 차이가 뚜렷이 있음을 나타냈다. 오른손의 구심성 수축에서는 오른손을 담당하는 영역인 왼쪽의 일차운동피질영역에서만 활성도가 나타난 반면, 원심성 수축 운동에서는 반대측인 오른쪽의 일차운동영역과 보조운동영역에서도 활성도가 나타났다. 보조운동영역은 수의운동의 복합적 연속운동의 계획과 체간 및 사지의 근위 근육의 협동과 자세의 조절을 담당하는 구역으로 이처럼 구심성 운동에서는 활성화되지 않았던 보조운동영역이 원심성 수축 운동시 활성화되었다는 것은 원심성 운동이 구심성 운동보다 좀 더 복잡하고 정교한 움직임을 요하는 것으로 사료된다.

신체의 움직임에서 구심성 수축 운동과 원심성 수축 운동은 일상생활 활동의 필수적인 요소이며, 그 중요성에 따라 많은 연구가 진행되고 있을 뿐 아니라 환자의 치료적 중재 과정에서 근육의 수의적 움직임이 필수적인 물리치료 영역에서도 관심도가 증가하고 있다. 따라서, 이러한 이미징 기법을 이용하여 원심성 수축과 구심성 수축 사이의 차이를 알아내는 것은 환자를 치료하는 치료사의 입장에서 근거를 바탕으로 한 치료를 할 수 있는 기초 자료를 제공할 것이라 사료된다. 본 연구는 기능적 자기공명 영상을 통하여 구심성 수축 운동과 원심성 수축 운동의 뇌 활성도를 연구한 최초의 보고라고 할 수 있으며, 비록 3명의 대상자를 이용한 파일럿 형태의 연구라는 제한점이 있지만, 앞으로의 연구에서 다수의 대상자를 통한 실험적 입증과 좀 더 다양하고 세분화된 과제를 개발하여 연구를 진행한다면 근육의 수축 방법에 따른 뇌 운동신경망의 활성기전을 밝힐 수 있을 것으로 생각된다.

V. 결론

본 연구는 기능적 자기공명 영상 기법을 통하여 손목 신전근의 구심성 수축 운동과 원심성 수축 운동시 뇌 활성도의 차이를 알아보고자 하였다. 그 결과 우성인 오른손의 운동 수행 시 구심성 수축 운동에서는 오른손의 운동 영역인 좌측의 일차운동 영역에서만 활성도가 나타난 반면, 원심성 수축 운동에서는 양측의 일차운동영역과 보조운동영역에서 활성도가 나타났다. 이러한 뇌 활성도의 차이는 구심성 수축 운동보다 원심성 수축 운동이 더 복잡하고 정교한 메커니즘을 통하여 일어나는 것으로 생각된다.

Author Contributions

Research design: Park JW, Kim CS

Acquisition of data: Kim JH

Analysis and interpretation of data: Park MK

Drafting of the manuscript: Park JW, Kim CS

Administrative, technical, and material support: Park MK

Research supervision: Kim CS

참고문헌

1. Komi PV, Bosco C. Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Med Sci Sports.* 1978;10(4):261-5.
2. Ishikawa M, Douset E, Avela J et al. Changes in the soleus muscle architecture after exhausting stretch-shortening cycle exercise in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2006;97(3):298-306.
3. Stein RB, Estabrooks KL, McGie S et al. Quantifying the effects of voluntary contraction and inter-stimulus interval on the human soleus h-reflex. *Exp Brain Res.* 2007;182(3):309-19.
4. Abbruzzese G, Morena M, Spadavecchia L et al. Response of arm flexor muscles to magnetic and electrical brain stimulation during shortening and lengthening tasks in man. *J Physiol.* 1994;481(Pt 2):499-507.
5. Hortobagyi T, Hill JP, Houmard JA et al. Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. *J Appl Physiol.* 1996;80(3):765-72.
6. Sale DG. Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc.* 1988;20(5 Suppl):S135-45.
7. Westing SH, Cresswell AG, Thorstensson A. Muscle activation during maximal voluntary eccentric and concentric knee extension. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1991;62(2):104-8.
8. Sekiguchi H, Kohno Y, Hirano T et al. Modulation of corticospinal excitability during lengthening and shortening contractions in the first dorsal interosseus muscle of humans. *Exp Brain Res.* 2007;178(3):374-84.
9. Asmussen E. Positive and negative muscular work. *Acta physiol scand.* 1953;28:364-82.
10. Ishikawa M, Niemela E, Komi PV. Interaction between fascicle and tendinous tissues in short-contact stretch-shortening cycle exercise with varying eccentric intensities. *J Appl Physiol.* 2005;99(1):217-23.
11. Nicol C, Avela J, Komi PV. The stretch-shortening cycle : A model to study naturally occurring neuromuscular fatigue. *Sports Med.* 2006;36(11):977-99.
12. Tesch PA, Dudley GA, Duvoisin MR et al. Force and emg signal patterns during repeated bouts of concentric or eccentric muscle actions. *Acta physiol scand.* 1990;138(3):263-71.
13. Enoka RM. Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *J Appl Physiol.* 1996;81(6):2339-46.
14. Fang Y, Siemionow V, Sahgal V et al. Greater movement-related cortical potential during human eccentric versus concentric muscle contractions. *J Neurophysiol.* 2001;86:1764-72.
15. Yang GA, Kim SH, Lim YE et al. Comparison of the activity of cortical neurons according to muscle contraction type between post stroke hemiplegic subjects and healthy subjects. *J Kor Soc Phys Ther.* 2009;21(1):73-80.
16. Choi JH, Kwon YH. Medial reorganization of primary motor cortex in patient with traumatic brain injury: A fmri case study. *J Kor Soc Phys Ther.* 2005;17(3):421-8.
17. Krakauer JW, Pine ZM, Ghilardi MF et al. Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *J Neurosci.* 2000;20(23):8916-24.
18. Kim YH, You SH, Ko MH et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation-induced corticomotor excitability and associated motor skill acquisition in chronic stroke. *Stroke.* 2006;37(6):1471-6.
19. Cramer SC, Bastings EP. Mapping clinically relevant plasticity after stroke. *Neuropharmacology.* 2000;39(5):842-51.
20. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness:

- The edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1971;9:97-113.
21. Cramer SC, Bastings EP. Mapping clinically relevant plasticity after stroke. *Neuropharmacology*. 2000;39(5):842-51.
 22. Park JW, Jang SH. The difference of cortical activation pattern according to motor learning in dominant and non-dominant hand: An fmri case study. *J Kor Soc Phys Ther*. 2009;21(1):81-8.
 23. Lacerte M, deLateur BJ, Alquist AD et al. Concentric versus combined concentric-eccentric isokinetic training programs: Effect on peak torque of human quadriceps femoris muscle. *Arch Phys Med Rehabil*. 1992;73(11):1059-62.
 24. Seger JY, Thorstensson A. Muscle strength and myoelectric activity in prepubertal and adult males and females. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1994;69(1):81-7.
 25. Xiong J, Ma L, Wang B et al. Long-term motor training induced changes in regional cerebral blood flow in both task and resting states. *Neuroimage*. 2009;45(1):75-82.
 26. Aagaard P, Simonsen EB, Trolle M et al. Specificity of training velocity and training load on gains in isokinetic knee joint strength. *Acta physiol scand*. 1996;156(2):123-9.