

## 근 길이에 따른 근 섬유 동원률의 차이

송영희, 정이정  
연세대학교 대학원 재활학과

조상현  
연세대학교 보건과학대학 물리치료학과 및 보건과학연구소

### Abstract

#### The Effect of the Muscle Firing Rate on Muscle Length

Song Young-hee, M.Sc., P.T.  
Chung Yi-jung, M.Sc., P.T.  
Dept. of Rehabilitation Therapy, The Graduate School, Yonsei University

Cho Sang-hyun, Ph.D., M.D.  
Dept. of Physical Therapy, College of Health Science, Yonsei University  
Institute of Health Science, Yonsei University

The purpose of this study was to find the difference in muscle firing rate between each muscle according to the knee angle with the quadriceps femoris which is a representative action muscle of the lower extremity. Seven normal healthy subjects were recruited. The median frequency (MDF) of muscle contraction was recorded from vastus lateralis, vastus medialis, and rectus femoris muscles using the surface EMG, in 5 seconds, during maximal isometric knee extension. The data were analyzed by the two-way repeated ANOVA. The results of the study were as follows: 1) median frequency of muscle contraction was significantly higher at the vastus lateralis, vastus medialis, and rectus femoris in descending order. 2) median frequency of muscle contraction was significantly higher at the 30°, 60°, and 90° in descending order. Consequently, muscle recruitment at the knee decreases the EMG activity of the lengthened muscle. This study suggests that the change in EMG activity at different muscle lengths resulted in affecting the muscle firing rate during the knee extension.

**Key Words:** Knee; Muscle firing rate; Muscle length.

### I. 서론

근육이 낼 수 있는 힘의 크기를 결정짓는 요소 중 하나는 근섬유의 동원률(firing rate)이다. 동원률이란 시간당 발생 횟수로서 이것은 초당 나타나는 펄스(pulse)를 측정함으로써 가능하다. 이 용어는 동원주파수(firing frequency)라는 말보다 문헌에서 자주 사용되어지는데, Basmajian과 De Luca(1985)에 의하면 주파수라는 용어는 운동단위(motor unit)의 방전(discharge)

사이의 주기성을 의미하는 것이기 때문에 실제적으로는 의미 차이가 있다고 한다.

일반적으로 동원률에 관한 연구는 주로 등척성 수축(isometric contraction) 동안 동원률과 힘과의 상관관계에 관한 연구들이 많다. Clamann(1970)은 상완이두근을 대상으로 한 연구에서 가장 낮은 힘의 수준에서 동원되는 운동단위의 동원률이 7~12 pps이었고, 등척성 힘이 증가하면서 최대 20 pps까지 증가하였다. 그러나 상완이두근의 거의 모든 운동단위가 75% MVC 이상에서는 더 이상 동원되지 않으며 100% MVC에서조차도 20 pps 이상 동원되지 않는 것으로 관찰되었다. Person과

**표 1. 대상자의 일반적인 특성**

(N=7)

대상자	성별	나이(세)	신장(cm)	체중(kg)
1	남	33	174	76
2	남	29	164	60
3	남	29	164	69
4	남	26	173	83
5	여	29	158	51
6	여	25	163	52
7	여	34	160	58
		29.3±3.3 <sup>a</sup>	165.1±6.1	64.1±12.2

<sup>a</sup>평균±표준편차

Kudina(1972)는 넙다리곧은근을 연구하였는데 이 근육의 경우 낮은 역치의 운동단위가 5~11 pps에서 동원되기 시작해 45%MVC에서는 18~21 pps에 도달한다는 것을 발견하였다. 이처럼 운동단위의 최소 동원률은 동원되는 역치값과 비례하게 증가한다.

근 수축동안 운동단위 동원률 특성의 가장 유용한 측정법은 동원률의 평균값을 시간으로 계산하는 것이다. 수의적 수축동안 개개의 운동단위에 의해 발생하는 힘의 직접적인 측정은 어려우나, 개개의 운동단위들의 동원양식이나 동원률은 침전극이나 표면전극에 의해 감지되는 근전도 신호의 분석으로 쉽게 알 수 있다. 이처럼 표면근전도(surface-detected electromyographic: sEMG) 신호는 수축하는 동안 근 활성화의 정도를 연구하는데 자주 사용된다(Komi와 Tesch, 1979). 특히 주파수 분석을 통해 근섬유의 동원력을 예측할 수 있으며, 근전도 신호를 통한 근 길이의 변화에 따른 근활성도의 측정은 여러 가지 서로 다른 신체활동 동안 근섬유의 동원력을 이해하는데 있어 기본이 된다(Mohamed 등, 2002).

근 길이 변화에 따른 근활성도의 측정에 관한 기존 연구결과들을 살펴보면 몇몇 연구자들은 근 길이가 증가하면 근활성도가 감소한다고 보고하였고(Andriacchi 등, 1984; Heckathorne와 Childress, 1981; Lunnen 등, 1981), 근 길이의 변화와 관계없이 근활성도에는 변화가 없다고 보고한 이들도 있다(Eloranta와 Komi, 1981; Vredenburg와 Rau, 1973). 또 다른 연구결과들은 근 길이와 등척성수축력 사이에는 정비례관계가 존재한다고 입증하였다(Currier, 1977; Felder, 1978; Morrison, 1970). 이처럼 기존연구결과들이 서로 상반되어 혼란을

줄 뿐만 아니라 근 길이에 따른 근육의 토크 및 최대 등척성 수축과의 상호관계에 관한 연구는 많이 이루어졌지만 근 길이에 따른 근섬유 동원률에 대한 근활성도 연구는 미비한 것이 사실이다(Andriacchi 등, 1984; Kennedy와 Cresswell, 2001; Lunnen 등, 1981). 따라서 본 연구에서는 무릎에서 각도에 따른 근 길이의 변화 정도가 큰 넙다리네갈래근에서 등척성 수축 시 각 근육의 동원률의 변화를 알아보고자 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상

하지에 근골격계와 신경계 이상이 없는 정상 성인 7명을 대상으로 실험하였으며 실험을 실시하기 전에 연구목적과 방법에 대하여 대상자에게 충분히 설명 한 후 동의를 얻어 실시하였다.

### 2. 연구방법

#### 가. 대상근육

대상근육은 넙다리곧은근(rectus femoris), 안쪽넓은근(vastus medialis), 가쪽넓은근(vastus lateralis)이며 넙다리곧은근은 ASIS에서부터 슬개골의 상부지점까지의 50% 지점에, 안쪽넓은근은 무릎의 안쪽 관절선에서 ASIS까지 거리의 20%되는 지점에 거의 45도 각도로 근섬유방향과 일치하도록 부착하였고 가쪽넓은근은 대전자 머리부분과 외측대퇴상과 사이 중간지점에 전극을



그림 1. EMGworks 신호 처리 및 분석 시스템

부착하였다(Pincivero 등, 2003).

#### 나. 실험기구

각도별로 넓다리곧은근, 안쪽넓은근, 가쪽넓은근의 근섬유 동원력을 알아보기 위해 EMGworks 3.0 Acquisition Program<sup>1)</sup>이 사용되었다(그림 1). 전극은 DE-3.1 이중 차등 전극(double differential electrodes) 3개를 사용하였다. 신호의 표본 수집률은 1000 Hz 설정하였으며, 60 Hz 노치 필터(notch filter)를 이용하였다. 근전도의 신호저장과 신호처리를 위해서 Acqknowledge 3.7.2<sup>2)</sup> 프로그램을 사용하였다.

#### 다. 실험방법

실험하는 동안 각각의 대상자들은 고관절이 90°로 고정되고 무릎은 각도변화가 가능한 등받이가 있는 특수 의자(N-K table)에 앉도록 하였으며 불필요한 대상 작용을 방지하기 위해 체간과 골반 그리고 발목을 벨크로 스트랩(velcro straps)으로 고정하였다.

실험 전 피부저항성을 감소시키고 전극부착을 용이하게 하기 위해 면도기로 제모를 한 후에 사포로 살짝 문지른 후 알콜로 닦아냈다. 그 다음 젤이 살짝 묻혀 있는 근전도 전극을 위에서 언급한 부착지점에 테이프로 붙여 고정하였다.

대상자는 각각 무작위적으로 선택된 30°, 60°, 90° 각도에서 5초간 최대로 힘을 주도록 실험자에 의해 독려되었

으며 세 번 측정하여 중간의 3초간 중앙 주파수값을 평균값으로 사용하였다. 각 측정 사이에 3분간의 휴식시간을 주어 피로가 충분히 풀리도록 하였다(Conwit 등, 1999).

### 3. 분석방법

각도별로 각 근육들의 동원력을 나타내는 주파수의 차이를 보기 위하여 반복측정된 이요인 분산분석(two-way repeated ANOVA)을 하였다. 통계학적인 유의성 검증을 위하여 유의수준  $\alpha=0.05$ 로 하였으며 통계처리를 위해 윈도우용 SPSS version 11.0 프로그램을 사용하였다.

## III. 결과

### 1. 근육별 무릎 신전시 주파수 비교

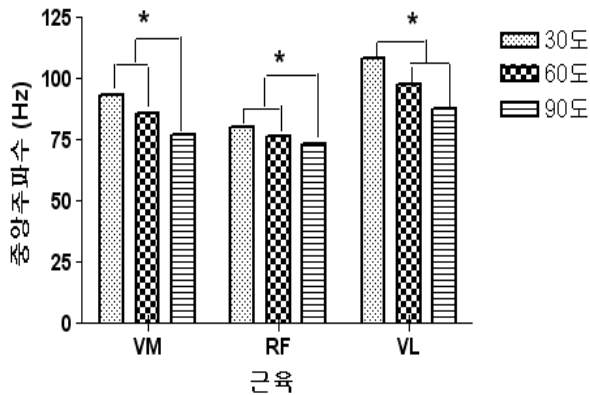
무릎 신전시 각 근육별로 근섬유 동원력을 나타내는 중앙주파수가 유의한 차이를 보였으며( $p<0.05$ ), 가쪽넓은근, 안쪽넓은근, 넓다리곧은근 순으로 중앙주파수가 크게 나타났다(그림 2).

### 2. 각도별 무릎 신전시 주파수 비교

무릎 신전시 각도별로 근섬유 동원력을 나타내는 중앙주파수가 유의한 차이를 보였으며( $p<0.05$ ), 30°, 60°, 90° 순으로 중앙주파수가 크게 나타났다(그림 3).

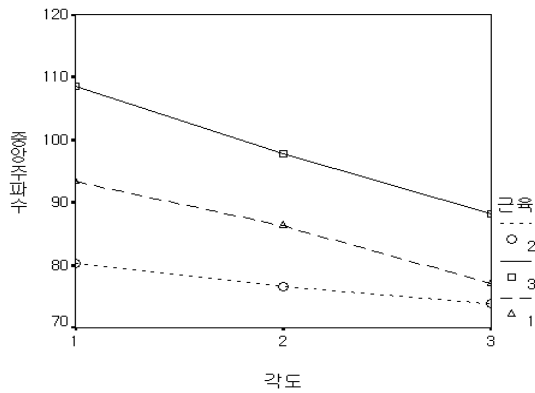
1) Delsys Inc. Boston, MA, U.S.A.

2) Biopack system Inc. Santa Barbara, CA. U.S.A.



RF: rectus femoris, VL: vastus lateralis,  
VM: vastus medialis

그림 2. 근육별 중양주파수의 크기



근육1: 안쪽넓은근, 근육2: 넓다리곧은근,  
근육3: 가쪽넓은근

각도1: 30°, 각도2: 60°, 각도3: 90°

그림 3. 각도별 중양주파수의 크기

#### IV. 고찰

본 연구는 근 길이에 따른 근섬유 동원률의 차이를 알아보기 위해 넓다리 네갈래근들을 대상으로 다양한 무릎 관절 각도에서 각 근육간 근 섬유 동원률에 차이가 있는지 알아보았다. 연구결과 가쪽 넓은근의 근섬유 동원률이 가장 크게 나타났고 그 다음으로 안쪽넓은근, 넓다리곧은근 순으로 나타났다. 근섬유 동원률이 가장 크게 나타난 각도는 30°로 나타났으며, 그 다음은 60°, 90° 순으로 나타났다. 따라서 근 길이가 짧을수록 중앙

주파수가 크게 나타나 근길이가 증가할수록 근활성도가 감소한다는 기존 연구결과를 뒷받침하였고(Andriacchi 등, 1984; Heckathorne와 Childress, 1981; Lunnen 등, 1981), 뿐만 아니라 넓다리네갈래근을 이루는 근육들 중 대상근육에서 제외된 중간넓은근을 제외하고 가쪽 넓은근의 근 활성도가 각도에 관계없이 가장 크다는 것을 알아냈다.

근육에 의해 생성되는 토크의 양은 활성운동단위의 수, 근 길이, 그리고 근육의 모멘트 팔(moment arm)에 의해 결정된다. 근 길이와 등척성 수축력 사이의 관계는 Morrison(1970)에 의해 근육의 활성수축요소와 근육의 수동적인 탄력성 요소에 영향을 받는다고 기술되었다. 근활성도와 근 길이와의 관계에 대한 반대의견도 있다. Liberson(1962)과 그 동료들은 근 길이가 짧아지면서 근육의 활성도가 떨어진다고 발표하였다. 반면에 Inman 등(1952)과 Miwa와 Tanaka(1963)는 짧아진 근 길이에서 근활성도가 증가한다고 하였다. Libet 등(1959)은 장딴지근의 전기적 활성도가 중간 근 길이에서 최대이며 근육이 길어질 때나 짧아질 때에는 최소라고 하였다. 근육의 움직임팔에 있어서의 변화는 등척성 토크와 근활성도의 생성에 있어 서로 다른 영향을 준다. 근육의 움직임팔이 증가 할수록 기록되는 토크의 생성은 증가하는 반면에 근활성도는 감소하였다. 이는 본 연구결과와 동일하며 위에서 언급한 Inman 등(1952)과 Miwa와 Tanaka(1963) 그리고 Lunnen 등(1981)의 연구결과와도 내용이 부합된다. 이러한 결과에 영향을 주는 주된 요소들은 근육의 해부학적 생김새, 즉, 근육과 평행하게 있는 탄력적 요소들, 수축요소들 그리고 골지간 기관으로부터의 신경 지배와 관련이 있을 수 있다. 즉, 근육이 길어지면서 평행하게 위치해 있는 탄력적 요소들이 신장된다. 이들 섬유들은 탄력밴드처럼 움직일 것이며 신장되면서 수동적으로 생성된 힘이 증가하기 때문이다. 전체적인 근력은 일정하게 유지되면서 수동적인 근 요소에 의해 생성된 힘의 증가는 결과적으로 수축요소인 힘의 감소를 일으킨다. 따라서 소수의 운동단위들만이 활동하게 되며 결과적으로 근활성도의 감소를 나타내게 된다. 또 다른 요소로 근섬유 교차결합의 위치이다. 근육의 활성수축요소에 의한 힘의 발달은 각 근육원섬유마디(sarcomere)의 액틴과 미오신섬유의 상대적 위치에 의해 결정된다. 근섬유의 가장 효과적인 길이는 근력과 근활성도와의 관계 사이의 비율이 최대가 되는 길이일 것이다. 근섬유의 효과가 최대가 되는

위치는 근 길이가 최대가 되는 위치에서 나타난다. 따라서 짧아진 근 길이는 근섬유들의 효과가 감소한다 (Goldon 등, 1966; Komi, 1977; Morrison, 1970). 몇몇 연구들은 서로 다른 근 길이에서의 근활성도 변화는 골지건기관으로부터의 구심성신경지배의 자동적 억제에 결과될 수 있다고 제안했다(Libet 등, 1959; Miwa와 Tanaka, 1963). 이들 연구들은 건들의 길이가 늘어난 위치에 있을 때 건에 위치해 있는 억제성 구심성 신호가 자동적으로 근 활동을 감소시킨다고 지적했다.

본 연구에서 서로 다른 근길이에서 최대 등척성 수축을 유도한 이유는 근섬유의 동원률이 %MVC와 비례한다는 Conwit 등(1999)의 결과 때문이다. 또한 %MVC가 높을수록 평균동원률이 높아진다는 것은 Person과 Kudina(1972)에 의해 입증되었는데 그들은 넙다리 끝은근에서 낮은 역치의 운동단위가 5-11pps에서 발화되기 시작해 45%MVC에서는 18~21pps에 도달한다는 것을 발견하였다. 그들은 또한 운동단위의 동원 역치가 높을수록 힘은 증가되지만 동원률이 증가되는 운동단위는 반대로 적어진다는 것을 발견했다.

본 연구에서 수축시간을 5초로 제한한 것은 지속적인 수축 시 운동단위들의 동원률이 근력의 산출과 관계 없이 감소하는 경향을 보이기 때문이다. 이러한 특성은 운동신경 적응과정의 반영이나 혹은 근육의 흥분성 감소로 생각되어지며 Person과 Kudina(1972)에 의한 넙다리끝은근을 대상으로 한 실험에서 일정한 힘의 수축 시 발생한다고 처음으로 기록되어 졌다.

동원률은 근육이 내는 힘의 크기를 결정짓는 중요한 요소이기 때문에 동원률의 특성을 잘 이해하는 것은 효과적인 운동이나 효율적으로 근력증강을 하는 방법을 모색하기 위해 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구 결과를 바탕으로 넙다리 네갈래근 운동 시 근 섬유 동원률이 큰 무릎 굴곡각도 30°에서 운동하는 것이 효과적인 근력증강방법이 될 것으로 생각된다.

본 연구의 제한점으로는 대상자 탈락으로 인하여 결과적으로 대상자의 수가 너무 적었고 하지의 근육에만 국한하여 실험하였다는 점이다. 따라서 후속 연구에서는 대상자 수를 좀 더 늘리고 상지 근육을 추가한 연구가 필요하며 또한 본 연구결과를 임상에 직접 적용하여 결과를 입증하는 것이 필요하겠다.

## V. 결론

본 연구에서는 무릎의 최대 등척성 신전 시 가쪽넓은근의 근섬유가 가장 많이 동원되며, 그 다음은 안쪽넓은근, 넙다리끝은근 순으로 나타남을 알 수 있었다. 또한 근육의 길이가 무릎 굴곡 30°에서 신전시 근섬유가 가장 많이 동원됨을 통해 무릎신근 강화 훈련시 적절한 자세에서의 훈련을 고려해야 할 것이다.

## 인용문헌

- Andriacchi TP, Anderrson GI, Ortengern R. A study of factors influencing muscle activity about the knee joint. *J Orthop Res.* 1984;1:266-275.
- Basmajian JV, De Luca CJ. *Muscles Alive*. 5th edition, Baltimore, Williams & Wilkins, 1985.
- Clamann HP. Activity of single motor units during isometric tension. *Neurology.* 1970;20:254-260.
- Conwit RA, Stashuk D, Tracy B, et al. The relationship of motor unit size, firing rate and force. *Clin Neurophysiol.* 1999;110:1270-1275.
- Currier DP. Positioning for knee strengthening exercises. *Phys Ther.* 1977;57:148-152.
- Eloranta V, Komi PV. Function of the quadriceps femoris muscle under the full range of forces and differing contraction velocities of concentric work. *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 1981;21:419-431.
- Felder CR. Effect of hip position on quadriceps and hamstring force(abs). *Med Sci Sports.* 1978;10:64.
- Goldon AM, Huxley AF, Julian FJ. The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fiber. *J Physiol.* 1966;184:170-192.
- Heckathorne CW, Childress DS. Relationships of the surface electromyogram to the force, length, velocity, and contraction rate of the cine plastic human biceps. *Am J Phys Med.* 1981;60:1-19.
- Inman VT, Ralston HJ, Saunders CM, et al. Relation of human electromyogram to muscle tension. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1952;4:187-

194.

1973;1:607-622.

- Kennedy PM, Cresswell AG. The effect of muscle length on motor-unit recruitment during isometric plantar flexion in humans. *Exp Brain Res.* 2001;137:58-64.
- Komi PV. Structure and function of skeletal muscles: A round table. *The Physician and Sports-medicine.* 1977;5:34-49.
- Komi PV, Tesch P. EMG frequency spectrum, muscle structure, and fatigue during dynamic contractions in man. *Eur J Appl Physiol.* 1979;42:41-50.
- Liberson WT, Dondey M, Asa MM. Brief repeated isometric maximal exercises: An evaluation by integrated electromyography. *Am J Phys Med.* 1962;41:3-14.
- Libet B, Feinstein B, Wright W. Tendon afferents in autogenetic inhibition in man. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1959;2:129-140.
- Lunnen J, Yack J, LeVeau B. Relationship between muscle length, muscle activity and torque of hamstring muscles. *Phys Ther.* 1981;61:190-195.
- Miwa N, Tanaka T. Electromyography in kinesiological evaluation: Subjects on the two joint muscle tension and electromyogram. *J Japan Ortho Association.* 1963;36:11-21.
- Mohamed O, Perry J, Hislop H. Relationship between wire EMG activity, muscle length, and torque of the hamstrings. *Clin Biomech.* 2002;17:569-579.
- Morrison JB. The mechanics of muscles function in locomotion. *J Biomech.* 1970;3:437-451.
- Person RS, Kudina LP. Discharge frequency and discharge pattern in human motor units during voluntary contractions of muscle. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1972;32:471-483.
- Pincivero DM, Coelho AJ, Campy RM, et al. Knee extensor torque and quadriceps femoris EMG during perceptually-guided isometric contractions. *J Electromyogr Kinesiol.* 2003;13:159-167.
- Vredenburg J, Rau G. Surface electromyography in relation to force, muscle length and endurance. *New Develop Electromyogr Clin Neurophysiol.*