

근전도를 이용한 Sorensen 검사시 성인남녀 등 근육의 근피로도 분석

이미선, 김태영
연세대학교 대학원 재활학과 물리치료전공

Abstract

Spectral Electromyographic Fatigue Analysis of Back Muscles in Healthy Adult Men and Women During Sorensen Test

Lee Mi-seon, B.H.Sc., R.P.T.
Kim Tae-young, B.H.Sc., R.P.T.

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

Trunk holding test (Sorensen test) appear to have more value than strength test in prediction the occurrence of low back pain. Electromyographic activity of trunk extensor muscles during these test may provide clues to the etiology of neuromuscular-based low back pain. This study investigated the difference in back muscle endurance between healthy adult men and women using surface electromyographic (EMG) power spectral analysis. Thirty healthy subjects (15 men and 15 women) performed an unsupported trunk holding test for 60 seconds. Recording surface electrodes were placed over the erector spinae medially and laterally at vertebral levels of L₁ and L₅. Slope of total frequency was evaluated using the MP100WSW Fast Fourier Transform spectrum analysis program. The slopes of all indices of back muscle fatigue, except right L₅, were significantly steeper in men than in women ($p < 0.05$). Our results indicated that the trunk holding test using EMG power spectral analysis of erector spinae muscles is useful for the evaluation of fatigue rate of these muscles. Our results also showed a higher muscle endurance in healthy adult women than in men.

Key Words: Power spectral analysis; Erector spinae; Fatigue.

I. 서론

근 피로는 요통 환자에서 빈번히 관찰되는 장애이며, 또한 요통을 유발시키는 위험요인이다(Biering-Sorensen, 1984; Cooper 등, 1993; Kankaanpaa 등, 1998; Mayer 등, 1989; Moffroid, 1997; Nicolaisen과 Jorgensen, 1985; Roy 등, 1989; Roy 등, 1995). 요통 환자들은 등 근육의 지구력이 정상적이고 일상적인 신체 활동이 가능한 사람들보다 등에 관한 문제가 발생할 확률이 더 높다(Roy 등, 1989). 등 근육은 요추를 보호하며, 상체를 앞으로 숙이는 동작 수행시에 주로 작용한다(Adams과 Hutton, 1986). 이러한 등 근육의 기능은 근 피로에 의해 손상받으며, 근래에는 만성 요통과 등 근육의 높은 피로도(fatigue rate) 사이의 연관성이 연구되고 있다. 이러한 연구들은 여자가 남자보다 일반적으로 근 피로도에 대한 저항이 더 높다고 보고하였다(Mannion 등, 1998, Umezu 등, 1998). Thorstensson과 Carlson(1987)은 조직화학적 분석을 통하여 남자보다 여자의 등 근육의 산소 잠재량이 더 많음을 보고하였다

등 근육의 피로를 평가하기 위해 사용되어 왔던 측정 방법들은 대상자의 동기(motivation)에 의해 많은 영향을 받았다. Krus-Weber 검사나 Sorensen 검사는 등 근육의 지구력을 평가하기 위해 수축 지속 시간(endurance time)을 측정하였다. 이 지속 시간은 근육의 내부 피로뿐만 아니라 통증에 견디는 힘이나 경쟁심 등에 의해서도 영향을 받는다. 또한 이러한 평가방법들은 근 피로도를 정확히 정량화할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 등 근육의 지구력을 평가하기 위해서 근전도 power spectrum 분석을 사용하며, 보다 정확하고 객관적으로 근 피로를 정량화하여 측정할 수 있다(Biedermann 등, 1990; Dieen 등, 1993; Mannion과 Dolan, 1994; Ng와 Richardson, 1996; Roy 등, 1995; Umezu 등, 1998). 체간 유지와 같은 등척성 수축을 이용한 검사에서

등 근육의 피로도를 측정하기 위해 사용되는 근전도 power spectrum 분석의 신뢰성은 여러 연구들에서 증명되었다(Mannion과 Dolan, 1994; Ng와 Richardson, 1996; Thompson과 Biedermann, 1993). 또한 이 방법은 등척성 수축을 유지하는 동안 국소 부위 근육의 피로 발달을 평가할 수 있는 가치있고 비침해적인 기술로 광범위하게 사용되고 있다(Mannion 등, 1997).

등척성 수축을 유지하는 동안 적분된 근전성 신호(integrated EMG signals)는 일반적으로 증가하며, 주파수가 power spectrum에서 보다 낮게 압축(compression)되는 것을 알 수 있다. 이것은 FFT(Fast Fourier Transforms) 방법을 사용하여 순수한 근전성 신호(raw EMG signals)를 주파수의 power spectrum으로 전환한 후 확인할 수 있다(Dolan 등, 1995). 지속적인 등척성 수축 시에 발생하는 피로도는 평균 주파수(mean frequency)나 중앙 주파수(median frequency)같은 power spectrum의 특징적인 요소를 측정함으로써 알 수 있다(Merletti 등, 1992; Roy 등, 1997). 근전도 power spectrum의 평균 주파수나 중앙 주파수의 감소 비율은 작업 지속시간, 그리고 근육이 힘을 내는 능력과 높은 상관성을 가진다(Mannion과 Dolan, 1994; Mannion과 Dolan, 1994; Sparto 등, 1997). 이는 어떤 작업을 수행할 때 발생하는 피로의 근전기적·기계적 지표(myoelectric & mechanical indices) 사이에 밀접한 관계가 있음을 의미한다. 초기의 평균 주파수와 중앙 주파수의 감소 비율은 근섬유 종류, 근 횡단 부위, 신경 전달 속도 등에 의존한다(DeLuca, 1984; Kondraske 등, 1989).

전형적으로 두부(cephalic)보다 미부(caudal) 근육의 근전도 주파수 감소가 더 크다고 보고되고 있다(Kupa 등, 1995). Roy 등(1989)은 제 1, 2번 요추보다 제 5번 요추에서 중앙 주파수 크기가 더 많이 감소한다고 하였다. Mannion과 Dolan(1994)도 체간보다는 요부의 척추 기립근에서 더 큰 중앙 주파

수 감소가 나타난다고 하였다. 그러나 일반적으로 좌우 등 근육의 근전도 주파수는 유의한 차이를 보이지 않는다(Umezu 등, 1998). 등 근육의 지구력을 평가하기 위한 연구들은 성별에 따라 차이가 있다고 보고하고 있다(Mannion과 Dolan, 1994). 근전도 분석을 이용한 최근의 연구들도 여자가 남자보다 근 피로도에 대한 저항이 더 높다고 보고하고 있다(Mannion 등, 1998, Umezu 등, 1998). 그러나 근전도 power spectrum 분석을 사용하여 남녀 간의 등 근육 피로도 차이를 비교한 국내 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 이 연구의 목적은 근전도 power spectrum을 이용하여 건강한 성인 남녀의 등 근육의 근 피로도를 비교함으로써 지구력이 성에 따라 차이가 있는지 알아보려고 하는 것이다. 또한 등 근육 좌우의 근 피로도를 비교하여 차이가 있는지 알아보려고 한다.

II. 연구방법

1. 연구 대상

연구대상은 연세대학교 재활학부에 재학중인 학생들로 남자 15명, 여자 15명이며 본 연구에 참여를 동의한 사람을 대상으로 하였다. 이전에 요통을 앓았던 병력이 있거나 병리학적인 이상이 있는 대상자는 본 실험에서 제외되었다. 연구대상자들의 일반적인 특징은 표 1과 같다.

2. 실험 기기

등 근육의 활동전위를 측정하기 위해 MP100WSW¹⁾을 사용하였고, 직경 10 mm의 은/은 염화 표면 전극²⁾과 직경 25 mm의 접지 전극이 자료 수집을 위해 사용되었다. Sampling rate은 200 Hz로 하였고, filtering은 high pass로 5 Hz를 적용하였다. 대상자의 휴식과 옆드린 자세에서의 측정을 위한 침상과 실험시 제거되는 바퀴달린 탁자가 사용되었다. 대상자의 엉덩관절과 무릎관절, 그리고 발목관절의 고정을 위한 고정끈과 실험중 대상자의 수평자세를 유지시키기 위한 고정대가 사용되었다(그림 1). 휴식시간과 실험시간은 초시계로 측정하였다.

표 1. 연구대상자들의 일반적인 특징

(N=30)

성	나이(세)	키(cm)	몸무게(kg)
남자(n ₁ =15)	24.20±1.52	172.88±2.37	63.53±4.55
여자(n ₂ =15)	21.40±0.83	161.10±5.24	52.58±7.01

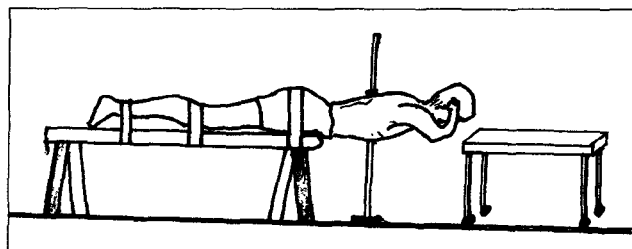


그림 1. 체간 유지 검사(Sorensen test) 자세

1) BIOPAC Systems Inc., U.S.A.

2) Nicolet Biomedical Inc., U.S.A.

3. 실험 과정

먼저 대상자를 바로 누운 자세로 5분 동안 휴식하게 하였다. 휴식시간이 끝나면 대상자는 엎드린 자세를 취하며 전상장골극(anterior superior iliac spine)이 침상 끝에 위치하도록 하였다. 대상자의 엉덩관절과 무릎관절, 그리고 발목관절은 고정끈을 사용하여 침상에 고정시켰다.

근전성 신호는 요장늑근(iliocostalis lumborum)과 다열근(multifidus)으로부터 기록된다. 요장늑근에서 나오는 신호를 기록하기 위해 첫 번째 요추 극돌기에서 왼쪽과 오른쪽으로 각각 3 cm 떨어진 곳에 전극을 부착시켰고, 다열근에서 나오는 신호를 기록하기 위해 다섯 번째 요추 극돌기에서 왼쪽과 오른쪽으로 각각 3 cm 떨어진 곳에 전극을 부착시켰다. 본 연구에서는 혼선(cross-talk)을 최소화하기 위해 가지전극법(branched electrode technique)이 사용되었다. 두 개의 전극은 근섬유 진행방향과 평행하도록 부착시켰다. 한 전극은 음극에 연결되어 있고, 다른 전극은 양극에 연결되어 있으며, 각 전극간 거리는 20 mm로 하였다. 접지 전극은 견봉돌기(acromion)에 위치시켰다. 상체를 지지하고 있는 바퀴달린 탁자를 제거하기 전에 고정대의 높이를 조절하여 대상자가 수평한 자세를 유지할 수 있도록 하였다. 대상자에게 손을 귀에 대고 팔꿈치는 밖으로 향하는 자세를 취하도록 한 후, 바퀴달린 탁자를 제거하였다. 대상자에게 이 자세를 1분 동안 수평하게 유지하도록 요구하였다. 이를 위해 미리 준비해 둔 고정대

에서 대상자의 등이 떨어지지 않도록 유지하게 하였다.

이러한 과정을 통해 수집된 근전성 신호를 FFT 방법을 사용하여 power spectrum 분석하였다. 이 분석을 통해 얻은 주파수의 전체적인 기울기(slope)를 구하였다.

4. 분석 방법

SPSS/PC*(Statistical Package for the Social Sciences/Personal Computer*)가 분석을 위해 사용되었다. 남녀간의 차이를 비교하기 위해 짝비교 t-검정을 사용하였다. 통계학적 유의성을 검정하기 위해 유의수준 $\alpha=0.05$ 로 하였다.

III. 결과

1. 남녀간 요장늑근의 활동전위 비교

남녀간 요장늑근의 활동전위 비교에서 왼쪽과 오른쪽 모두 통계학적으로 유의한 차이가 있었다($p<0.05$)(표 2).

2. 남녀간 다열근의 활동전위 비교

남녀간 다열근의 활동전위 비교에서 왼쪽은 통계학적으로 유의한 차이가 있었지만($p<0.05$), 오른쪽은 유의한 차이가 없었다(표 3).

표 2. 남녀간 요장늑근(왼쪽, 오른쪽)의 활동전위 비교

(N=30, 단위: mV)

	남자($n_1=15$)	여자($n_2=15$)	t-값	자유도	p
왼쪽 요장늑근	0.2147±0.0728	0.1267±0.0299	4.771	14	0.000*
오른쪽 요장늑근	0.2360±0.0959	0.1453±0.0421	5.353	14	0.000*

* $p<0.05$

표 3. 남녀간 다열근(왼쪽, 오른쪽)의 활동전위 비교 (N=30, 단위: mV)

	남자(n ₁ =15)	여자(n ₂ =15)	t-값	자유도	p
왼쪽 다열근	0.2260±0.0549	0.1453±0.0421	3.396	14	0.004*
오른쪽 다열근	0.2020±0.0738	0.1600±0.0722	1.635	14	0.124

* p<0.05

표 4. 요장늑근과 다열근 활동전위의 좌우 비교 (N=30, 단위: mV)

	왼쪽	오른쪽	t-값	자유도	p
남자 요장늑근	0.2147±0.0728	0.2360±0.0959	1.508	14	0.154
(n ₁ =15) 다열근	0.2260±0.0549	0.2020±0.0738	1.082	14	0.298
여자 요장늑근	0.1267±0.0299	0.1453±0.0421	1.092	14	0.293
(n ₂ =15) 다열근	0.1453±0.0421	0.1600±0.0722	-1.970	14	0.069

3. 요장늑근과 다열근 활동전위의 좌우비교

요장늑근과 다열근의 좌우비교에서 남녀 모두 통계학적으로 유의한 차이가 없었다(표 4).

IV. 고찰

척추 자체는 매우 불안정한 구조물이므로 이를 보상하기 위해 근육과 주위 조직이 적절한 지지를 하고 있다(Dieen, 1996). 근육의 지구력이 약해지거나 피로가 발생하면 이러한 기능적 역할 수행이 어려워지고 요통이 발생할 위험이 높아진다. 따라서 등 근육의 기능과 피로도를 평가하여 현재의 상태를 정확히 파악하고 적절한 치료를 적용하기 위한 평가 방법이 필요하게 되었다. 최근에는 등척성 수축 시에 표면 전극을 사용하는 근전도 분석 방법이 많이 사용되고 있다. 이것은 표면 전극을 통해 기록되는 순수한 근전성 신호를 FFT 방법을 사용하여 power spectrum 분석하는 것이다. 많은 연구들이 Sorenson 검사나 Kraus-Weber 검사같은 체간 유지 검사

와 근전도의 power spectrum 분석이 등 근육의 피로도 측정 시에 신뢰할 수 있는 방법이라고 보고하고 있다(Biedermann 등, 1990; Biedermann, 1991; Mannion과 Dolan, 1994; Moffroid 등, 1994; Ng와 Richardson, 1996).

본 실험에서는 순수한 근전성 신호의 잡음(noise)을 제거하기 위해 5Hz의 high pass filtering을 적용했다. 표면 근전성 신호에는 의도하지 움직임 등에 의해서 잡음이 섞이게 되는데, 등척성 수축과 같은 정적인 상태에서는 대부분 5Hz 이하의 낮은 주파수로 발생한다(Dolan 등, 1995). 따라서 보다 정확하게 분석하기 위해 그 이하의 주파수를 제외하였다. 그리고 sampling rate는 구하고자 하는 평균 주파수의 두 배가 적절하다는 Nyquist criterion에 의해서 200 Hz로 정하였다(Dolan 등, 1995; Roy 등, 1989). 대상자들은 근전도를 사용하여 등 근육의 피로도를 측정하기 전에 바로 누운 자세에서 5분 간의 휴식을 취했다. 이는 대상자의 등 근육을 이완시켜서 실험시에 발생할 수 있는 오류를 제거하기 위해서 시행하였다. Ng와 Richardson(1996)도 근전

도 power spectrum을 이용한 건강한 대상자의 등 근육의 지구력 평가에 관한 신뢰성 연구에서 각 측정 사이 5분 간의 휴식 시간을 주었다. 그들은 이 5분 간의 휴식 시간 후에 근전도 power spectrum 신호가 정상수준으로 회복되었다고 하였다. Dolan 등(1995)도 근전도를 사용한 반복적인 근피로도 측정 시에 회복을 위해서 5분 간의 휴식시간을 적용하였다. 본 연구에서는 L1 부위와 L5 부위의 power spectrum의 적분된 근전성 신호 간에 유의한 차이를 확인할 수 없었다. 그러나 다른 연구들은 L1과 L2 부위보다 L5 부위가 피로에 더 민감하다고 보고하였다(Roy 등, 1989; Roy 등, 1997). 이는 두 부위의 근 섬유 성질이 다르기 때문이다. 원위부의 근육일수록 생화학적 변화에 민감한 type II 섬유의 비율이 더 높아서 쉽게 피로해진다(Gerdle 등, 1993; Sirca와 Kostevc, 1985). 그리고 등에 대한 기계적 연구에서 보고한 것처럼 근 부하/loading)의 분포에 차이가 있기 때문이다(Roy 등, 1989). 또한 다열근(L5)은 주로 자세를 유지하는 역할을 수행하고, 척추기립근(L1)은 체간의 움직임에 주로 작용한다. 따라서 자세유지 검사에서의 등척성 수축은 척추기립근보다는 다열근의 피로를 더 많이 유발시킨다. 다열근이 피로로 인해 약해졌을 경우 척추기립근이 이를 보상한다(Ng와 Richardson, 1996). Biede-rmann 등(1991)은 만성 요통환자들이 정상인에 비하여 다열근의 피로도가 높은 반면, 척추기립근에서는 별다른 차이를 확인하지 못했다.

일반적으로 좌우의 등 근육은 근피로도에 있어서 유의한 차이를 보이지 않는다(Roy 등, 1989; Umezu 등, 1998). 이는 정상인뿐만 아니라 요통 환자에서도 확인할 수 있다(Collins 등, 1982; Jayasinghe 등, 1978). 그러나 Cram과 Steger(1983)는 요통환자의 좌우 등 근육의 심한 불균형을 보고했으며, Hoyt 등(1981)도 작업 수행시에 요통환자와 정상인의 좌우 등 근육의 절대적인 차이를 확인하였다. Jones와 Wolf(1980)는 어느 한쪽에만

역학적 결함(mechanical deficit)이 있을 때 좌우 등 근육의 차이가 나타난다고 하였다.

여러 연구들이 성인 남녀의 등 근육의 피로도가 동일하지 않다고 보고하였다(Mannion과 Dolan, 1994; Sparto, 1997; Umezu, 1998). 본 연구에서도 오른쪽 다열근을 제외하고는 등 근육의 피로도가 남녀간에 유의한 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 체간 유지 검사와 같은 등척성 수축 시에 남자가 지지하는 부하는 여자보다 15% 정도 더 많다(Oddson 등, 1991). 남녀 간의 체지방 비율이 남자는 17%, 여자는 28%로 다르며, 그 분포에 있어서도 여자는 주로 지방 조직이 상체에 더 많이 분포한다(Miller 등, 1993). 그리고 남자는 중력 중심으로부터 체간의 거리가 여자보다 더 멀기 때문에 지렛대의 원리에 의해 더 많은 힘을 소모하게 된다. Mannion과 Dolan(1994)은 상체가 지지하는 부하를 계산하였는데, 평균 부하는 남자 161 Nm, 여자 121 Nm이었다. 등 신전근의 최대 근력의 평균값은 남자가 406 Nm, 여자가 246 Nm이었다. Thorstenson과 Carlson(1987)은 조직화학적 분석을 통하여 남자보다 여자의 등 근육의 산소 잠재량이 더 많음을 보고하였다. 근 수축 시에 근육의 내압(intramuscular pressure)이 증가하면 혈액의 흐름을 제한하게 된다. 부과되는 부하와 절대적인 수축력을 동일하게 적용하였을 때, 일반적으로 혈액순환이 제한되는 정도는 여자보다 남자가 더 높게 나타난다(Barnes, 1980; Oddson 등, 1991). 따라서 남자는 여자보다 등척성 수축 시에 혈류 공급량 감소에 의한 저산소 상태로의 진전이 보다 빨라져서 피로도 발생이 더 높아진다(Nicolaisen과 Jorgensen, 1985).

성별에 따른 등 신전근의 피로도 차이는 근 섬유 종류에 따른 횡단면과 분포의 차이로서 가장 타당성 있게 설명된다. 남녀 척추기립근의 요추부는 type I 섬유의 구성비율이 남자(56%)보다 여자(73%)에서 더 높다(Thorstenson과 Carlson, 1987). 이러한 type I 섬유 구성비율의 차이로 여자의 척추기립

근 지구력이 남자에 비해 더 우세한 이유를 설명할 수 있다. Mannion과 Dolan(1994)은 체간근의 생검(biopsies)을 실시하여 비록 절대적인 섬유 종류의 비율은 유사하지만 type I 섬유의 횡단면이 남자보다 여자가 더 크다는 것을 확인하였다(Mannion 등, 1998; Umezu 등, 1998).

V. 결론

본 연구에서는 근전도 power spectrum을 이용하여 건강한 성인 남녀의 등 근육의 피로도를 비교함으로써 지구력이 성별에 따라 차이가 있는지 알아보려고 하였다. 건강한 성인남녀 30명을 대상으로 체간 유지 검사(Sorensen test)를 적용하는 동안 등 근육의 피로도를 측정하였다. 피로도는 MP100WSW Fast Fourier Transform spectrum 분석 프로그램을 이용하여 근전성 신호를 수집하여 분석하였다. 연구결과를 통해 Sorensen 검사시 남자의 등 근육이 여자보다 더 빨리 피로해짐을 알 수 있었다. 이것은 남녀간 등 근육의 체지방 비율과 분포의 차이, 근 수축시 근육 내압의 증가로 인한 혈액공급량 감소와 그로 인한 저산소 상태로의 진전 속도 차이, 그리고 type I 섬유 구성비율의 차이로 그 이유를 설명할 수 있다. 앞으로의 연구에서는 이러한 다양한 원인이 근전성 신호 변화와 어떤 연관성을 가지는지 대한 연구가 필요할 것이다.

인용문헌

Adams MA, Hutton WC. Has the lumbar spine a margin of safety in forward bending? Clin Biomech. 1986;1:3-6.

Barnes WS. The relationship between maximum isometric strength and intramuscular circulatory occlusion. Ergo-

nomics. 1980;23:351-357.

Biedermann HJ, Shanks GL, Forrest WJ, et al. Power spectrum analyses of electromyographic activity. Discriminators in the differential assessment of patients with chronic low-back pain. Spine. 1991;16:1179-1184.

Biedermann HJ, Shanks GL, Inglis J. Median frequency estimates of paraspinal muscles: Reliability analysis. Electromyogr Clin Neurophysiol. 1990; 30:83-88.

Biering-Sorensen F. Physical measurement as risk indicators for low-back trouble over a one-year period. Spine. 1984;9: 106-119.

Collins GA, Cohen MJ, Naliboff BD, et al. Comparative analysis of paraspinal and frontalis EMG, heart rate and skin conductance in chronic low back pain patients and normals to various postures and stresses. Scand J Rehabil Med. 1982;14:39-46.

Cooper RG, Strokes MJ, Sweet C, et al. Increased central drive during fatiguing contraction of the paraspinal muscles in patients with chronic low back pain. Spine. 1993;18(5):610-616.

Cram JR, Steger JR. EMG scanning in the diagnosis of chronic pain. Biofeedback Self Regul. 1983;8:229-241.

DeLuca CJ. Myoelectric manifestations of localized muscular fatigue in humans. CRC Crit Rev Biomed Eng. 1984;11:251-279.

Dien JH. Asymmetry of erector spinae muscle activity in twisted postures and consistency of muscle activation patterns across subjects. Spine. 1996;22 :2651-2661.

Dien JH, Oude Vrielink HHE, Housheer

- AF, et al. Trunk extensor endurance and its relationship to electromyogram parameters. *Eur J Appl Physiol.* 1993; 66:388-396.
- Dolan P, Mannion AF, Adams MA. Passive tissues help the back muscles to generate extensor moments during lifting. *J Biomech.* 1994;27:1077-1085.
- Gerdle B, Edstrom M, Rahm M. Fatigue in the shoulder muscles during static work at two different torque levels. *Clin Physiol.* 1993;13:469-482
- Hides JA, Stokes MJ, Saide M, et al. Evidence of lumbar multifidus muscle wasting ipsilateral to symptoms in patients with acute/subacute low back pain. *Spine.* 1994;19:165-172.
- Hoyt WH, Hunt HH, De Pouw MA, et al. Electromyographic assessment of chronic low back syndrome. *J Am Osteopath Assoc.* 1981;80:57-59.
- Jayasinghe WJ, Harding RH, Anderson JAD, et al. An electromyographic investigation of postural fatigue in low back pain: A preliminary study. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1978;18:191-198.
- Jones AL, Wolf SL. Treating chronic low back pain: EMG biofeedback training during movement. *Phys Ther.* 1980;60: 58-63.
- Kankaanpaa M, Taimela S, Laaksonen D, et al. Back and hip extensor fatigability in chronic low back pain patients and controls. *Arch Phys Med Rehabil.* 1998;79:412-417.
- Kondraske GV, Deivanayagam S, Carmichael T, et al. Myoelectric spectral analysis and strategies for quantifying trunk muscular fatigue. *Arch Phys Med Rehabil.* 1989;68:103-110.
- Kupa EJ, Roy SH, Kandarian SC, et al. Effects of muscle fiber type and size on EMG median frequency and conduction velocity. *J Appl Physiol.* 1995;79:23-32.
- Mannion AF, Connolly B, Wood K, et al. The use of surface EMG power spectral analysis in the evaluation of back muscle function. *J Rehabil Res Dev.* 1997;34(4):427-439.
- Mannion AF, Dolan P. Electromyographic median frequency change during isometric contraction of the back extensors to fatigue. *Spine.* 1994;19(11): 1223-1229.
- Mannion AF, Dolan P. Relationship between mechanical and electromyographic manifestations of fatigue in the quadriceps femoris muscle of humans. *Proceedings of the 24th Annual Meeting of the Neurosciences Society, Satellite Symposium on Neural and Neuro-muscular Aspects of Muscle Fatigue, Miami, FL.* 1994:32.
- Mannion AF, Dumas GA, Stevenson JM, et al. The influence of muscle fiber size and type distribution on electromyographic measures of back muscle fatigability. *Spine.* 1998;23:576-584.
- Mayer TG, Kondraske G, Mooney V, et al. Lumbar myoelectric spectral analysis for endurance assessment: A comparison of normals with deconditioned patients. *Spine.* 1989;14(9):986-991.
- Merletti R, Knaflitz M, DeLuca CJ. Electrically evoked myoelectric signals. *Crit Rev Biomed Eng.* 1992;19(4):293-340.
- Miller A, MacDougall J, Tarnopolsky M, et al. Gender differences in strength and

- muscle fiber characteristics. *Eur J Appl Physiol.* 1993;66:254-256.
- Moffroid MT. Endurance of trunk muscles in persons with chronic low back pain: Assessment, performance, training. *J Rehabil Res Dev.* 1997;34(4):440-447.
- Ng JK-F, Richardson CA. Reliability of electromyographic power spectral analysis of back muscle endurance in healthy subjects. *Arch Phys Med Rehabil.* 1996;77:259-264.
- Nicolaisen T, Jorgensen K. Trunk strength, back muscle endurance and low-back trouble. *Scand J Rehabil Med.* 1985;17:121-127.
- Oddson L, Moritani T, Andersson E, et al. Differences between males and females in EMG and fatigability of lumbar back muscle. In: Anderson P, Hobart DJ, Danoff JV, eds. *Electromyographical Kinesiology. Proceedings of the 8th Congress of the International Society of Electrophysiological Kinesiology.* Amsterdam, Elsevier Science, 1991:295-298.
- Roy SH, DeLuca CJ, Casavant DA. Lumbar muscle fatigue and chronic lower back pain. *Spine.* 1989;14:992-1001.
- Roy SH, DeLuca CJ, Emley M, et al. Spectral electromyographic assessment of back muscles in patients with low back pain undergoing rehabilitation. *Spine.* 1995;20:38-48.
- Roy SH, DeLuca CJ, Emley M, et al. Classification of back muscle impairment based on the surface electromyographic signal. *J Rehabil Res Dev.* 1997;34(4):405-414.
- Sirca A, Kostevc V. The fibre type composition of thoracic and lumbar paravertebral muscles in man. *J Anat.* 1985;141:131-137.
- Sparto PJ, Parnianpour M, Reinsel TE, et al. Spectral and temporal responses of trunk extensor electromyography to an isometric endurance test. *Spine.* 1997;22(4):418-426.
- Thorstensson A, Carlson H. Fiber types in human lumbar back muscles. *Acta Physiol Scand.* 1987;131:195-202.
- Umezū Y, Kawazu T, Tajima F, et al. Spectral electromyographic fatigue analysis of back muscle in healthy adult women with men. *Arch Phys Med Rehabil.* 1998;79:536-538.