

## 키보드작업시의 국소 근 피로도 측정을 위한 Power Spectrum 분석의 유용성

가톨릭대학교 산업보건대학원 산업의학과 · 가톨릭대학교 산업의학센터\*

권순용 · 박정일\*, · 구정원\* · 임현우\* · 이강숙\*

— Abstract —

### Usefulness of Power Spectral Analysis for Measurement of Local Muscle Fatigue during Keyboard Task

Soon Yong Kwon, Chung Yill Park\*, Jung Wan Koo\*,  
Hyeon Woo Yim\*, Kang Sook Lee\*

*Department of Occupational Medicine, Graduate School of Occupational Health,  
The Catholic University of Korea, Seoul, Korea  
Catholic Industrial Medical Center, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea\**

**Objectives** : Work-related upper extremity disorders of the tendons, nerves, and muscles associated with repetitive motion represent an increasing proportion of occupational illnesses, medical services, and workers' compensation costs. Severe local muscle fatigue may be a precursor of repetition strain injuries. The demand for objective and quantitative assessment of local muscle fatigue is now increasing. The purpose of this study is to determine the usefulness of power spectral analysis of individual muscle as one of the objective spectral parameters in quantification of local muscle fatigue.

**Methods** : From 10 normal male without neuromuscular dysfunction, motor unit action potentials(MUAPs) of three muscles(upper trapezius, infraspinatus, and anterior deltoid) of left shoulder girdle were obtained. The surface electrodes were used and the changes of power spectrum according to frequency components were calculated per minute during the keyboard task for 30-minute period by power spectral analysis of MUAPs signal.

**Results** : There was a linear relationship between median frequency(MF) and time flow in the upper trapezius muscle, however the same was not observed in other muscles. The MF slope of the upper trapezius muscle showed a decline of the MF over time and reflected the fatigue rate. Other spectral parameters, such as mean frequency and total power were not significantly correlated to time flow during the keyboard task in all three muscles. And no significant correlation was observed between keying rate and slope of median frequency of upper trapezius muscle.

**Conclusions** : Above results suggested that the power spectral analysis on median frequency in upper trapezius muscle would be useful in quantification of local muscle fatigue during the keyboard task and local muscle fatigue of shoulder was affected by static posture, not by keying rate.

**Key Words** : Fatigue, Repetitive work, Quantitative analysis, Power spectrum,  
Median frequency

〈접수일 : 1999년 7월 6일, 채택일 : 1999년 9월 8일〉

교신저자 : 박 정 일 (Tel : 02-3779-1405) E-mail : CYPARK@cmc.cuk.ac.kr

## 서 론

불충분한 산소공급 또는 신진대사에 필요한 어는 한 물질의 고갈 등의 이유로 근육내의 수축요소에 원활하게 에너지를 공급하지 못할 때 근육이 피로하게 된다. 근육의 피로는 여러 가지로 정의되어 있는데 대표적인 것으로는 첫째, 일정한 자극에 대해 반응이 감소하는 것이고, 둘째는 같은 반응을 얻기 위해 더 많은 자극을 필요로 하는 것이다. 그 외에는 피로감, 근육의 통증 등 주관적인 감각을 포함하고 있으며, 의미에 있어서도 많은 부분이 혼용되어 사용되고 있다.

정적자세(static posture)로 시행하는 반복적인 수작업은 경부와 견관절의 동통 발생과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있고(Hagberg와 Wegman, 1987), 이 때 근육의 피로가 경부 및 견관절의 불편함 발생에 중요한 요소로 작용할 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 작업에의 노출과 근 피로 및 근육질환의 발생과의 연관관계를 정량화하기 위한 연구가 시도되고 있다.

현재까지 근육의 피로도 측정을 위해서 인체와 동물을 대상으로 많은 운동모델과 평가방법들을 이용해 왔는데, 여기에는 운동전·후의 혈청 크레아틴 키나아제 또는 젖산의 농도를 측정하는 혈액화학적 방법(Hagberg 등, 1982), 근육의 최대 수축력을 측정하는 운동역학적 방법(Fulco 등, 1995), 그리고 간섭양상의 분석(Leisman 등, 1995) 및 주파수 영역에서의 분석(Mannion과 Dolan, 1996; Ng와 Richardson, 1996; Veiersted, 1996)을 통한 전기생리학적 방법 등이 포함되어 있다. 이들 중에서 전기생리학적 방법은 근전도 신호를 이용하는 것으로서, 근전도 신호의 변화를 통해 근육의 대사상태 변화와 최대 수축력의 감소를 쉽게 감지할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 간섭양상의 분석은 시평면(time domain)에서 형태학적으로 연구하는 분석법이고, 주파수 영역에서의 분석은 주파수평면(frequency domain)에서 전체 일률, 평균주파수, 그리고 중간주파수 등을 지표로 사용하는 power spectrum 분석법이다. power spectrum 분석법은 운동단위 활동전위를 아날로그/디지털 변환을 거쳐 숫자화된 정보를 푸리에변환을 하고 해석하여 각 주

파수에서의 power를 구하는 분석법으로, 현재까지의 연구에 의하면, 피로가 증가함에 따라 중간 주파수의 값이 감소한다(Mannion과 Dolan, 1996; Ng와 Richardson, 1996; Veiersted, 1996)는 데 비교적 일치된 결과를 보이고 있다.

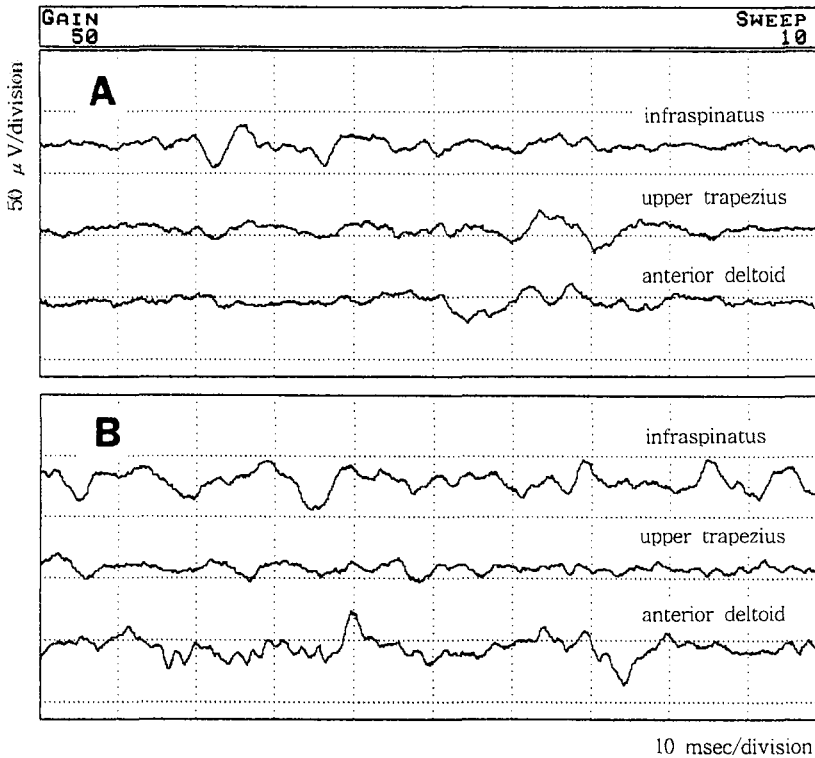
근전도 신호의 분석방법은 시평면(time domain) 분석과 주파수평면(frequency domain) 분석이 있으며, 전자는 운동단위 활동전위의 형태학적 분석법이고, 후자는 근전도 전체 일률, 평균주파수, 그리고 중간주파수 등을 지표로 사용하는 주파수 분석법이다. power spectrum의 분석은 운동단위 활동전위를 아날로그/디지털 변환을 거쳐 숫자화된 정보를 푸리에변환을 하고 해석하여 각 주파수에서의 power를 구하는 주파수 분석법으로서, 이때 주파수별 power의 양은 각 주파수에서의 에너지를 의미하게 된다.

컴퓨터작업이 많아진 현재의 사무직 근로자들 중에서 경부와 견관절의 불편함을 호소하는 환자들이 꾸준히 증가하고 있으며, 이들 중에는 적극적인 치료를 필요로 하는 경우도 흔하다. 정적자세에서 기인하는 국소적 근 피로가 이들의 전구증상일 것으로 예상되며, 근 피로가 축적될 경우에는 근육질환으로 발전하게 되어, 작업능률의 저하와 작업시간의 단축을 초래하게 될 것이다. 그러므로, 이러한 직업성 질환의 예방과 근로자 교육 및 작업환경 설정을 위해 근 피로도 측정법이 절실히 요구되고 있다. 그러나, 근 피로도를 측정하기 위한 현재까지의 연구들은 학문적인 동기나 많은 운동부하를 갖는 산업장에서의 응용을 위해 진행되어 왔고, 컴퓨터 작업을 주로 하는 일반 사무직 근로자들의 국소적 근 피로에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 power spectrum 분석을 이용하여, 키보드작업을 하는 동안에 견관절에서 근 피로가 빠르게 진행될 것으로 예상되는 세 개의 근육들(상부 승모근, 전 삼각근 및 극하근)에서의 시간경과에 따른 전기생리학적 변화를 관찰하고, 평균주파수, 중간주파수 및 전체 일률(total power) 중에서 근 피로를 객관적으로 표현해 줄 수 있는 근전도 지표를 알아보고자 하였다.

**Table 1.** The settings for electromyographic power spectral analysis

Parameters	Description
Muscle	Infraspinatus, Upper trapezius, Anterior deltoid
Recording electrode	Disc surface electrode(0.7 cm diameter)
Bandpass filter	100~2000 Hz
Sweep duration	10 msec/division
Sampling rate	6400 /sec
Gain(Sensitivity)	50 $\mu$ V/division



**Fig. 1.** An example of raw electromyographic signals of three muscles of left shoulder girdle during the keyboard task for 30-minute period.  
A: at the beginning of the task, B: at the 30 minutes of the task.

## 대상 및 방법

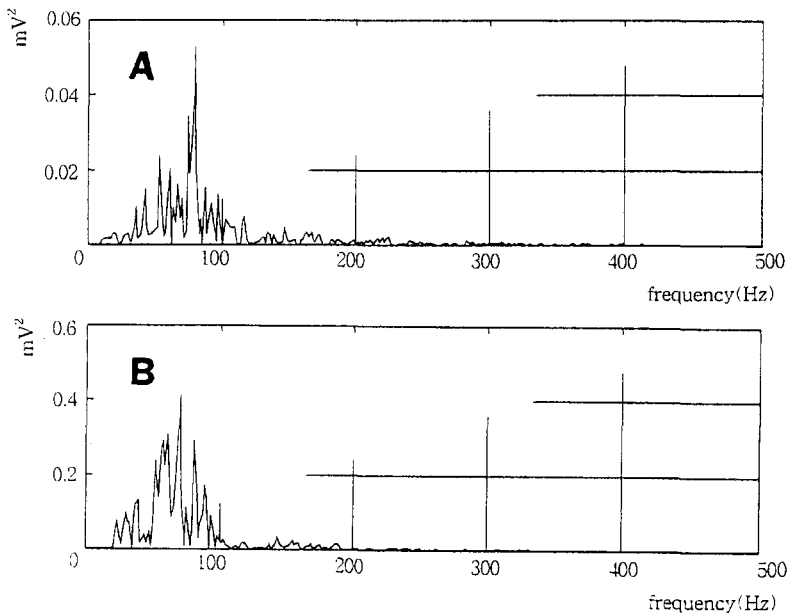
### 1. 대상

과거에 신경·근골격계의 병력이 없었고, 현재 근골격계 질환의 증상과 징후가 없는 10 명의 건강한 남자 지원자를 대상으로 하였고, 평균 연령은 29.0  $\pm$  3.2 세, 평균 체중은 72.6  $\pm$  6.6 kg, 평균 신장은

173.6  $\pm$  3.2 cm이었다. 대상자들이 키보드작업을 시작한지는 약 2.5 년이었으며, 하루 평균 약 3 시간의 키보드작업에 종사한다고 하였다.

### 2. 방법

실험기구는 근전도 기계(Excel, Cadwell Laboratories, Inc., U.S.A.)를 사용하였고, 근전도 신호의 처리는 푸리에변환(Fourier transfor-



**Fig. 2.** An example of power frequency spectrum of left upper trapezius muscle during the keyboard task for 30-minute period.  
 A: at the beginning of the task, B: at the 30 minutes of the task.

mation)을 하기 위해서 software인 Matlab for windows(version 4.2c.1, MathWorks, Inc.)를 사용하였다. 평균주파수는 산술평균에 의해 계산된 주파수로 정의하였고, 중간주파수는 power spectrum에서 면적을 똑같이 2 부분으로 나누는 주파수로 정의하였으며, 전체 일률은 power spectrum의 면적으로 정의하였다(De Angelis 등, 1990; De Luca, 1979).

근전도 기계의 설정은 gain을 구간당 50  $\mu$ V, sweep은 구간당 10 msec로 설정하였고, 외부 환경의 영향으로 인해 발생할 수 있는 노이즈(noise)를 최소화하기 위하여 주파수 여과범위는 lowcut을 100 Hz, highcut을 2000 Hz로 설정하였으며, 아날로그 신호의 디지털 변화에 필요한 sampling rate는 6400 Hz이었다(Table 1).

각 실험대상은 컴퓨터용 책상(높이 67 cm) 앞의 의자에 편안한 자세로 앉은 상태에서 양측 견관절은 중립위치로 유지하게 하였고, 주관절은 90° 굴곡시킨 후, 전완부를 회내시킨 상태에서, 휴식시간 없이 지속적으로 30 분간의 한글문서 키보드작업을 시행하였으며, 이때 좌측의 상부 승모근, 전 삼각근 및 극

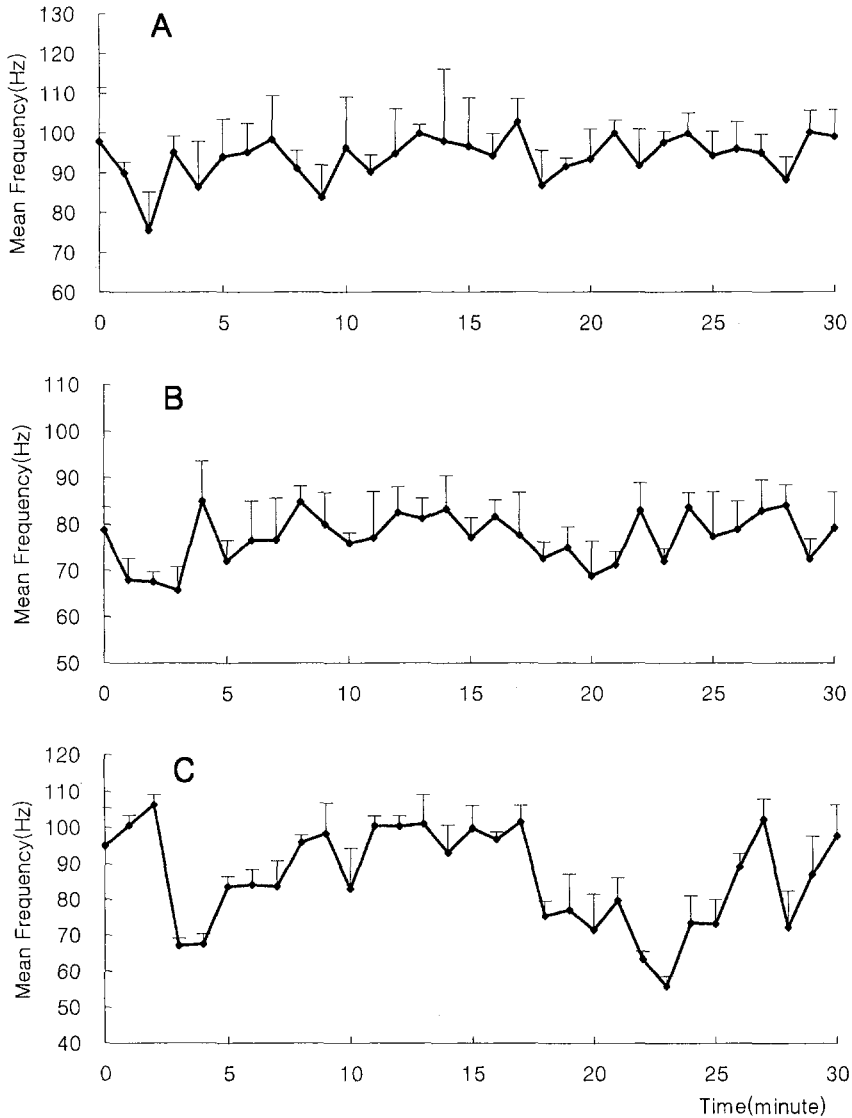
하근에 표면전극을 부착하여 이들 근육으로부터 발생하는 근전도 신호(Fig. 1)를 작업시작시부터 매 1 분마다 푸리에변환하여 분석하였다(Fig. 2). 분석은 근전도 기계내에서 디지털로 변환된 근전도 신호를 512 data point, 즉 80 msec의 기간동안 고속 푸리에변환을 하여 주파수영역에서 분석하였다. 1 분마다 2 초간 저장한 자료를 처음부터 80 msec씩 10 개의 block으로 나누었고, 각 block마다 평균 및 중간주파수와 전체 일률(total power)을 계산한 후에 10 개의 block에서 나온 결과를 평균하였다.

자료의 통계처리는 Microsoft사 Excel 97 프로그램의 단순선형 회귀분석을 이용하여, 시간의 경과에 따른 각 근전도 지표의 변화를 알아보았고, 이들 중에서 통계적으로 유의한 결과를 보인 지표와 타자 속도와의 상관관계도 분석하였다. 각 분석에서의 통계적 유의수준은  $\alpha = 0.05$  미만일 때로 하였다.

## 결 과

### 1. 시간경과에 따른 평균주파수의 변화

30 분간의 키보드작업을 하는 동안에 대상자들의



**Fig. 3.** Mean values of mean frequencies of three muscles in power spectrum during the keyboard task for 30-minute period. Bars designate standard deviations.

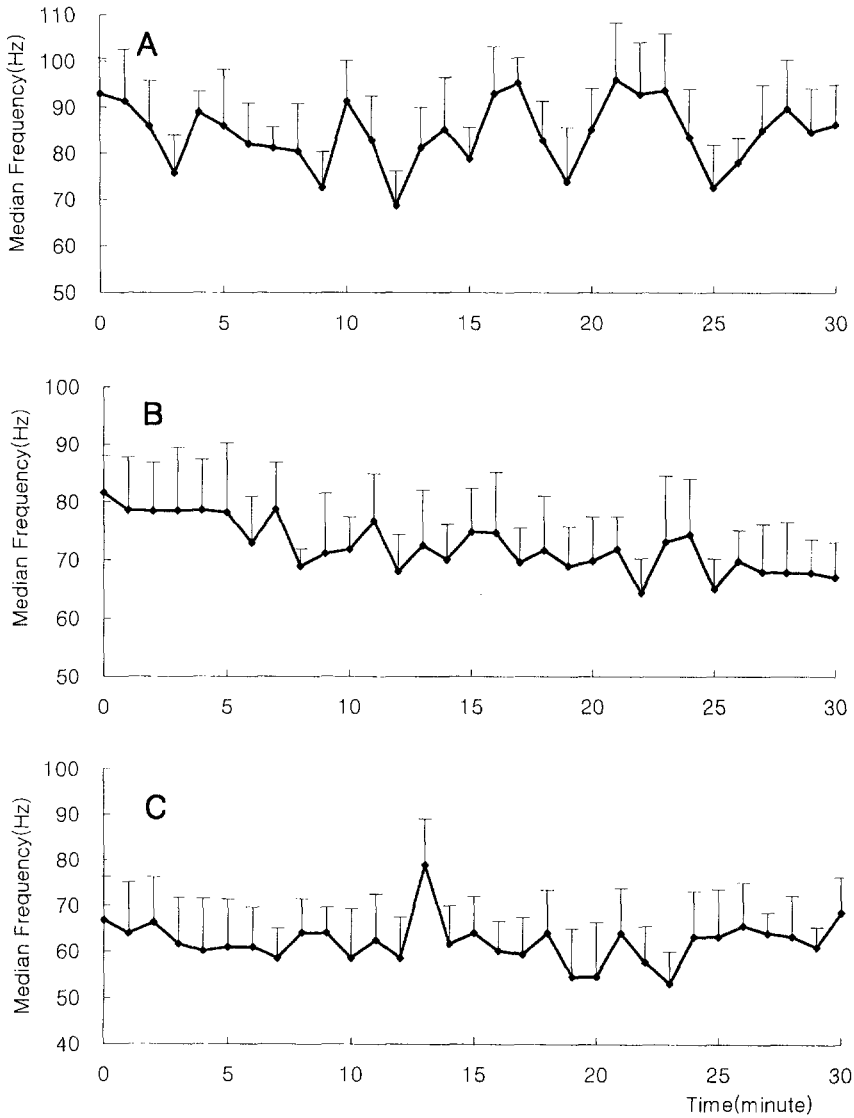
A: infraspinatus, B: upper trapezius, C: anterior deltoid

평균주파수는 상부 승모근, 전 삼각근 및 극하근에서 시간경과에 대해 유의한 상관관계를 보이지 않았고, 평균주파수 그래프의 기울기가 감소하지 않았다 (Fig. 3).

## 2. 시간경과에 따른 중간주파수의 변화

30 분간의 키보드작업을 하는 동안에 대상자들

의 중간주파수는 상부 승모근에서는 시간경과에 따라 유의한 역상관관계를 보였으나 ( $p < 0.05$ ), 극하근과 전삼각근에서는 유의한 상관관계를 보이지 않았다 (Fig. 4). 상부 승모근의 중간주파수는 작업시작시 평균  $81.7 \pm 6.4$  Hz였고, 30 분간의 작업후에는 평균  $67.1 \pm 6.1$  Hz였으며, 그래프의 식은  $y = -0.38x + 78.50$  ( $y$ : 중간주파수,  $x$ : 시간



**Fig. 4.** Mean values of median frequencies of three muscles in power spectrum during the keyboard task for 30-minute period. Bars designate standard deviations.

A: infraspinatus, B: upper trapezius, C: anterior deltoid

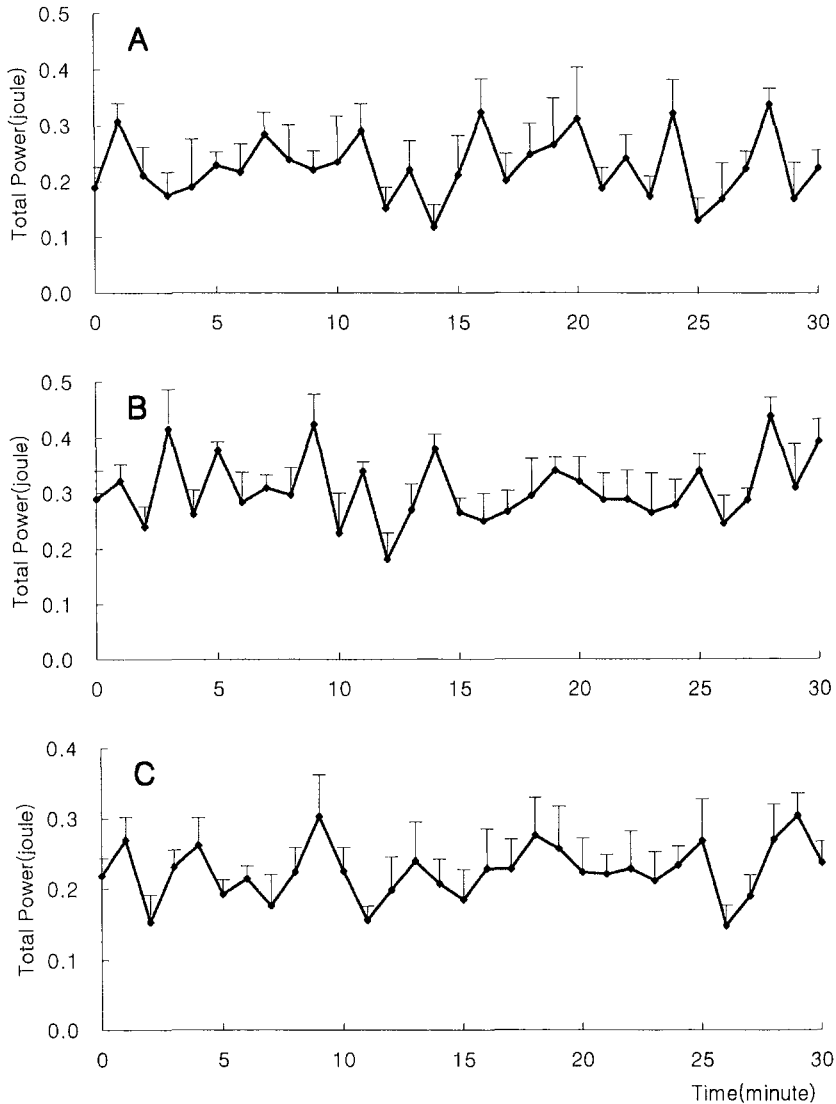
(분))이었다( $r=-0.39$ ).

### 3. 시간경과에 따른 전체 일률의 변화

30 분간의 키보드작업을 하는 동안에 대상자들의 전체 일률은 세 근육 모두에서 시간경과에 대해 유의한 상관관계를 보이지 않았다(Fig. 5).

### 4. 타자속도와 상부 승모근의 중간주파수 기울기 변화와의 관계

실험대상의 타자속도는 상부 승모근의 중간주파수 기울기값의 크기와 유의한 상관관계를 보이지 않았다(Fig. 6).



**Fig. 5.** Mean values of total power of three muscles in power spectrum during the keyboard task for 30-minute period. Bars designate standard deviations. A: infraspinatus, B: upper trapezius, C: anterior deltoid

## 고 찰

power spectrum 분석은 근전도의 정량적인 분석방법들 중의 한 방법으로서, 형태학적 분석이 아닌 주파수 분석을 이용함으로써 전기적 활성도의 양상에 다른 관점을 제공해 주고, 간섭양상의 골격(build-up)을 이해하는데 도움을 주어 왔다. 근수

축에 있어서 운동신경원과 운동단위 활동전위의 양적인 변화를 연구하기 위해 다양한 표면전극 근전도 기술들을 이용하고 있으며, 근자에는 표면전극 근전도의 power spectrum 지표들을 이용하여 신경근 육질환, 호흡근의 피로, 물리치료의 유용성, 그리고 체력훈련 등을 평가하기 위하여 근전도 신호의 특성을 분석하고 있다(Gross 등, 1979; John과 De Luca, 1985; MacIntyre 등, 1998).

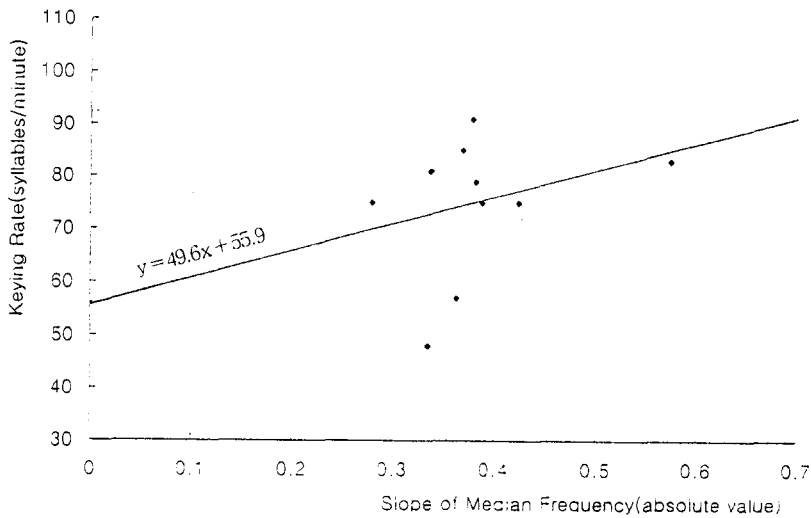


Fig. 6. The relationship between keying rate and slope of median frequency of left upper trapezius muscle(R=0.30, p=0.41)

측정 근육의 역할로는 상부 승모근의 경우 견갑골을 상승하는 작용을 하며, 극하근의 경우 견관절을 외회전시켜며, 전삼각근의 경우 견관절의 굴곡과 내회전을 한다(Jenkins, 1988). 이러한 근육들은 두 손을 들고서 하는 일 뿐만 아니라, 일반적으로 상지를 이용하는 역동적 동작들에서는 모두 동원되는 것으로 알려져 있다. 본 실험은 실험 설계상 상부승모근이 주로 작용을 하는 동작이며 isometric exercise에 가깝다.

현재까지 근육의 피로를 측정하기 위하여 주파수 평면 분석이 많이 이용되어 왔는데, 근육피로의 전기생리학적 조건은 주파수평면의 저주파대로의 이동과 진폭의 증가가 특징이라고 하였다(Basmajian과 De Luca, 1985; Broman 등, 1985; De Luca, 1985; Merletti와 De Luca, 1989; 이영희 등, 1994). Duchateau와 Hainaut (1991)는 피로시에 보여지는 중간 주파수는 수의적인 수축시에 사용하는 근육에서 대조군보다 감소정도가 컸고, 전기적으로 유도된 피로시에는 사용하지 않은 근육에서 더 크다고 하였다. 표면전극 근전도에서 근수축의 증가에 따르는 저주파수대의 증가는 임박한 횡문근의 피로(Lindstrom, 1970; Mortani와 Muro, 1978)나 호흡근 피로의 지표(Bazzy와 Haddad, 1980; Gross 등, 1979)로서 임상적으로 사용되어져 왔

나, Bigland-Ritchie와 Lippold(1979)에 의하면 근육피로가 없이도 저주파대로의 power spectrum 변화가 일어나기 때문에 그 유용성이 제한을 받다고 하였다.

근전도 power spectrum의 저주파대로의 이동에 대해서는 여러 기전들이 제시되고 있으며, 여러 가지의 요인들에 의해 영향을 받는다. 첫째로 그 중심성 요인은 운동단위의 동기발동(synchronization)의 증가(Bigland-Ritchie 등, 1983)와 활성속도의 감소(Bigland-Ritchie와 Lippold, 1979)이며, 둘째로 말초성 요인으로는 근육활동전위의 전도속도의 감소(Arther와 Bradley, 1985; Bigland-Ritchie 등, 1981; Kranz, 1983), 근육의 온도 감소(Bigland-Ritchie와 Lippold, 1979; Mortani, 1986; Petrofsky와 Lind, 1980), 전극간 간격의 증가(Sato, 1964; Serge, 1986), 그리고 근육 자체 길이의 증가(Bazzy 등, 1986) 등이 있다.

이번 연구에서는 Christensen(1986)이 조립공의 작업중 근 활성도와 피로도를 측정한 연구설정에서와 같이, 반복적인 수작업시에 피로가 빠르게 진행될 것으로 예상되는 세 개의 근육, 즉 상부 승모근, 극하근 및 전 삼각근에 표면전극 근전도를 이용하여 power spectrum 분석을 시도하였다. 하지만, 이들의 연구결과에서는 세 개의 근육 모두에서 power



spectrum의 저주파수대로의 감소를 보였으나, 본 연구에서는 상부 승모근에서만 중간주파수의 감소라는 유의한 결과를 얻었다. 그 이유로는 이들의 연구 설정이 역동적인 상지의 운동인데 반해, 본 연구의 설정은 정적인 자세의 키보드작업이었기 때문에 경부와 견관절의 정적자세 유지를 위해 상부 승모근이 주로 작용을 하고, 극하근과 전삼각근은 상대적으로 미미한 작용을 하기 때문일 것으로 생각된다.

또한, Veiersted (1996)가 판초콜렛(chocolate bar)을 포장하는 포장공들의 승모근에서 실시했던 근전도 주파수평면 분석에서도 중간주파수의 유의한 감소라는 같은 결과를 보임으로써, 승모근이 견관절의 자세유지에 중요한 역할을 하고 견관절의 근 피로도를 측정할 수 있는 유용한 대상임을 알 수 있다.

실험대상의 타자속도는 상부 승모근의 중간주파수 기울기값의 크기와 유의한 상관관계를 보이지 않았는데, 그 이유는 키보드작업을 하는 동안에 수부의 근육은 역동적으로 운동을 하지만 상부 승모근은 타자속도와 상관없이 지속적으로 정적자세를 유지하고 있기 때문일 것이다. 이는 Feuerstein 등(1997)의 연구와 유사한 결과이며, 이로써 타자속도는 견관절의 피로도 증가에 중대한 영향을 미치지 않다고 추정할 수 있다.

이번 연구에는 실험을 시행하기 전에 실험대상자들에게 누적되어 있던 피로의 정도를 측정하지 않았다는 제한점이 있으며, 근전도 기계의 특성상 외부로부터의 노이즈를 완전히 배제할 수 없다는 한계를 가지고 있다.

현재까지의 power spectrum 분석은 그 연구방법이 주로 등척성 운동으로서, 수의적인 근 수축시의 피로도를 평가하는데 주력해 왔다. 향후에는 이번 연구에서와 같은 정적자세에서의 피로도 뿐만 아니라, 역동적 움직임에 대한 근 피로도 평가를 위해서 노력을 기울여야 할 것이며, 근 피로도와 평균주파수 및 전체 일률과의 관계를 정립하기 위해서도 많은 연구가 있어야 할 것이다.

## 요 약

목적 : 키보드 작업을 하는 동안에 발생하는 운동 역학적 변화를 기준으로 하여, 견관절에서 근피로가 빠르게 진행될 것으로 예상되는 세 개의 근육들(상

부 승모근, 전 삼각근 및 극하근)에서의 시간경과에 따른 전기생리학적 변화를 관찰하고자 하였다.

방법 : 10 명을 실험대상으로 하여 30분간의 키보드 작업을 한 후 근전도의 power spectrum 분석을 이용하였다.

결과 : 세 개의 근육에서 평균주파수와 전체 일률은 시간경과에 대해 유의한 상관관계를 보이지 않았다. 상부 승모근의 중간주파수는 키보드작업을 하는 동안 시간경과에 따라 유의하게 감소하였으나, 극하근과 전삼각근의 중간주파수는 시간경과에 대해 유의한 상관관계를 보이지 않았다. 타자속도는 시간경과에 따른 상부 승모근의 중간주파수 변화에 대해 유의한 상관관계를 보이지 않았다.

결론 : 키보드작업을 하는 경우에 상부 승모근에서의 시간경과에 따른 중간주파수의 감시(monitoring)는 국소 근 피로도를 파악할 수 있는 유용한 도구로서의 가능성을 가지며, 타자속도는 견관절의 근 피로에 유의한 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- 이영희, 전세일, 박창일. 자발적 수축시 근 활동전위의 주파수 분석에 의한 인체 골격근의 특성. 대한재활의학회지 1994;18:311-327.
- Arther E, Bradley B. Simultaneous measurement of muscle conduction velocity and EMG power spectrum changes during fatigue. Muscle Nerve 1985;8:768-773.
- Basmajian JV, De Luca CJ. Muscles alive, Their functions revealed by electromyography. 5th ed. Baltimore:Williams & Wilkins, 1985.
- Bazzy AR, Haddad GG. Diaphragmatic fatigue in unanesthetized adult sheep. J Appl Physiol 1980;57:182-190.
- Bazzy AR, Kortton JB, Haddad GG. Increase in electromyogram low-frequency power in non-fatigued contracting skeletal muscle. J Appl Physiol 1986;61:1012-1017.
- Bigland-Ritchie B, Donovan EF, Roussos CS. Conduction velocity and EMG power spectrum changes in fatigue of sustained maximal efforts. Am J Physiol 1981;51:1300-1305.
- Bigland-Ritchie B, Johansson R, Lippold OC, Smith S, Woods JJ. Changes in motoneurone firing rates during sustained maximal contrac-

- tions. *J Physiol (Lond)* 1983;340:335-346.
- Bigland-Ritchie B, Lippold OC. Changes in muscle activation during prolonged maximal voluntary contractions. *J Physiol (Lond)* 1979;292:14-15.
- Broman H, Bilotto G, De Luca CJ. Myoelectric signal conduction velocity and spectral parameters : influence of force and time. *J Appl Physiol* 1985;58:1428-1437.
- Christensen H. Muscle activity and fatigue in the shoulder muscles of assembly-plant employees. *Scand J Work Environ Health* 1986;12(6):582-587.
- De Angelis GC, Gilmore LD, De Luca CJ. Standardized evaluation of techniques for measuring the spectral compression of the myoelectric signal. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 1990;37:844-849.
- De Luca CJ. Physiology and mathematics of myoelectric signals. *IEEE Transaction on Biomedical Engineering* 1979;26:313-325.
- De Luca CJ. Myoelectrical manifestation of localized muscular fatigue in humans. *CRC Biomed Eng* 1985;11:251-279.
- Duchateau J, Hainaut K. Effects of immobilization on electromyogram power spectrum changes during fatigue. *Eur J Appl Physiol* 1991;63:458-462.
- Feuerstein M, Armstrong T, Hickey P, Lincoln A. Computer keyboard force and upper extremity symptoms. *J Occup Environ Med* 1997;39(12):1144-1153.
- Fulco CS, Lewis SF, Frykman PN, et al. Quantitation of progressive muscle fatigue during dynamic leg exercise in humans. *J Appl Physiol* 1995;79(6):2154-2162.
- Gross D, Grassino A, Ross WR, Macklem PT. Electromyogram pattern of diaphragmatic fatigue. *J Appl Physiol* 1979;46(1):1-7.
- Hagberg M, Michaelson G, Ortelius A. Serum creatine kinase as an indicator of local muscular strain in experimental and occupational work. *Int Arch Occup Environ Health* 1982;50(4):377-386.
- Hagberg M, Wegman DH. Prevalence rates and odds ratios of shoulder-neck diseases in different occupational groups. *Br J Ind Med* 1987;44:602-610.
- Jenkins DB. Hollinshead's Functional Anatomy of the Limb and Back. 7th ed. Philadelphia : W.B. Saunders Company, 1988.
- John VB, De Luca CJ. *Muscles alive*. 5th ed. Baltimore : Williams & Wilkins, 1985:219-222.
- Kranz H. Factors determining the frequency content of the electromyogram. *J Appl Physiol* 1983;55:392-399.
- Leisman G, Zenhausern R, Ferentz A, Tefera T, Zemcov A. Electromyographic effects of fatigue and task repetition on the validity of estimates of strong and weak muscles in applied kinesiological muscle-testing procedures. *Percept Mot Skills* 1995;80:963-977.
- Lindstrom L. Muscular fatigue and action potential conduction velocity changes studied with frequency analysis of EMG signals. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1970;10:341-356.
- MacIntyre DL, Slawnych MP, Reid WD, McKenzie DC. Fatigue of the knee extensor muscles following eccentric exercise. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1998;38(1):3-9.
- Mannion AF, Dolan P. Relationship between myoelectric and mechanical manifestations of fatigue in the quadriceps femoris muscle group. *Eur J Appl Physiol* 1996;74(5):411-419.
- Merletti R, De Luca CJ. New techniques in surface electromyography. In : Desmedt JE, editor. *Computer-aided electromyography and expert system*. Amsterdam : Elsevier Science Publishers, 1989:115-124.
- Mortani T. Intramuscular spike analysis during ramp force and muscle fatigue. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1986;26:147-160.
- Mortani T, Muro M. Motor unit activity and surface electromyogram power spectrum during increasing force of contraction. *Eur J Appl Physiol* 1978;56:260-265.
- Ng JK, Richardson CA. Reliability of electromyographic power spectral analysis of back muscle endurance in healthy subjects. *Arch Phys Med Rehabil* 1996;77(3):259-264.
- Petrofsky JS, Lind AR. The influence of temperature on the amplitude and frequency components of the EMG during brief and sustained isometric contractions. *Eur J Appl Physiol* 1980;44:189-200.
- Sato M. Frequency components of the electromyogram led with the bipolar surface electrodes. *J Anthropol Soc Nippon* 1964;72:92-106.
- Serge H. Effects of electrode location on myoelec-

tric conduction velocity and median frequency estimates. *J Appl Physiol* 1986;61:1510-1517.  
Veiersted KB. Reliability of myoelectric trapezius

muscle activity in repetitive light work. *Ergonomics* 1996;39(5):797-807.