Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol.21, No.2, pp.25-33, July 2002

허리 폄 동작시 발생하는 근육피로 회복시간 연구

A Study of Trunk Muscle Fatigue and Recovery Time during Isometric Extension Tasks

김 정 룡 *

ABSTRACT

The purpose of the study is to investigate the relationship between the trunk muscle fatigue and recovery time during repetitive trunk extension by using a surface electromyogram(EMG). Ten healthy subjects participated in a simulated lifting task with five levels of recovery time and three levels of sub-maximal contraction. EMG signals of the L1(Lumbar 1st Vertebrae) and L3(Lumbar 3rd Vertebrae) level of the erector spinae muscle were recorded, and analyzed in terms of MPF(mean power frequency) parameter to quantify the level of muscle fatigue. It was found that MPF significantly ($p<0.05$) decreased during repetitive extension task at 50% and 75% sub-maximal contractions. Then it took three minutes for the trunk muscle to recover from fatigue during 50% sub-maximal contraction, and it took five minutes during 75% sub-maximal contraction. The recovery time estimated by the maximum force needs to be re-evaluated for the trunk muscle to fully recover from fatigue. In conclusion, the work/rest cycle needs to be studied based upon the information of muscle fatigue in order to prevent workers from musculoskeletal injuries during repetitive lifting task.

Keyword : 휴식시간, 근육피로, EMG, 들기작업

* 한양대학교 정보경영공학과
주소 : 경기도 안산시 사1동 한양대학교 기계정보경영공학부
전화 : 031 - 400 - 5266
E-mail : jykim@eml.hanyang.ac.kr

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

1. 서 론

산업 현장에서는 인력물자 취급작업(MMH job: manual material handling job)이 빈번히 행해지고 있으며, 무리한 중량 작업이나 반복 작업에 노출된 작업자들은 요통(LBP: low back pain) 및 기타 근골격계 질환을 빈번하게 경험하고 있는 실정이다. 이러한 근골격계 질환을 예방하기 위하여 작업 중 피로를 감소시키기 위한 작업-휴식 cycle의 개선연구가 이루어져 왔으나, 주로 산소소비량과 같은 에너지 대사량(metabolic cost)를 중심으로 연구가 이루어져왔다. 그러나 국부근육의 피로나 정적인 작업에 있어서는 에너지 대사손실이 거의 없는 것으로 보고 되었으며 (A.D.F Price, 1990), 이는 기존의 에너지 대사량 모델을 통하여 결정된 작업-휴식 cycle이 국부근육 피로에 의해 발생할 수도 있는 근골격계질환의 문제를 간과할 수 있다는 점을 보여주는 것이다.

근육피로와 관련해서, Rohmert(1973)는 전완(lower arm)을 대상으로 정적·동적 작업시 근육의 피로도와 회복시간을 결정하기 위한 휴식시간 결정모델을 개발하였고, 작업자의 최대 발휘시간(maximum holding time), 작업시간(loading time)을 이용하여 근육의 회복시간을 결정하는 방식을 사용하였다. Hermans(1998)는 휴식시간에 따른 어깨와 목근육의 피로와 회복시간과의 관계를 연구하였으며, 근육의 종류에 따라 회복률의 차이가 다르다는 것을 발견하였다.

Cornwall(1994)은 하지의 오른쪽 네갈래근(Quadriceps)을 대상으로 등척성 수축 작업에 따른 휴식시간을 측정하기도 하였다.

허리근육에 대한 연구들에서 허리의 근육사용에 따른 피로현상이 관찰되기도 하였으며 (Kumar and Narayan; 1998, 현수돈과 김정룡; 1997, 정명철과 김정룡; 1999), Kim and Chung(1995)은 허리 근육을 대상으로 반복적인 동적 들기 작업을 실시하여 자세와 중량물의 무게, 빈도의 효과를 근육의 활동도와 허리 근육의 피로도를 이용하여 설명하였으나, 근육의 누적피로효과와 피로회복도에 대한 직접적인 연구는 미흡한 실정이다.

그러므로, 본 연구에서는 본 연구에서는 들기 작업과 유사한 형태의 등척성 신전작업을 실험상황으로 설정하고, 반복적인 부하에 의한 근육피로의 누적효과와 휴식시간과의 관계를 근전도(EMG)를 사용하여 조사하였다. 본 연구의 목적은 요통재해를 예방하기위해 필요한 근육 피로도에 관련된 기초적이고, 정량적인 정보를 추출하는 것이다.

2. 연구방법

2.1 피실험자 및 귀무가설

과거에 요통경험이 없는 10명의 남자 대학원생들을 피실험자로 하였으며, 평균 나이 27.2세(±1.45)이고, 평균 신장 172cm (±3.23), 평균 체중 68.2kg(±4.26)이고, 모두 자발적 참여자로 한정하였다. 귀무가설은 들기 작업에 주로 쓰이는 요추근육을 대상으로, "모의 반복 작업시 휴식시간의 길이가 근

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

육피로에 영향을 주지 않는다"로 설정하였다.

2.2 실험장비

등척성 수축(isometric contraction)조건하에서 허리의 신전(extension)운동을 실시하기 위하여 인체공학연구실에서 제작한 ITEF(Isometric Trunk Exertion Frame)를 사용하였다. 피실험자의 자세를 일정하게 유지하기 위하여 엉덩이와 발목부분을 고정시킨 뒤 몸통의 신전동작시 MVC (maximum voluntary contraction)를 측정하기 위한 Bongshin Loadcell(500 kgf)을 사용하였다. 개인이 내고 있는 힘의 상태를 시각적으로 관찰하면서 일정수준의 sub-maximal 근육수축상태를 유지하기 위해 digital indicator BS-300A를 사용하였고, 선택한 근육으로부터 신호를 추출하기 위하여 Coulborn Instruments사의 EMG system을 사용하였고, 측정된 자료를 A/D(analog to digital) board를 통해 PC에 저장하였다.

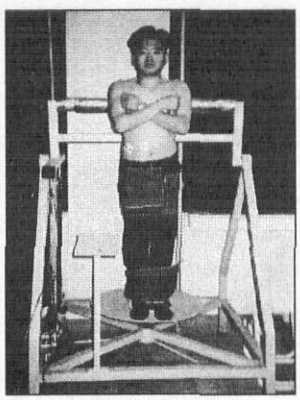

그림 1. ITEF (Isometric Trunk Exertion Frame)

2.3 실험설계

다양한 sub-maximal 근육수축상태와 다양한 휴식시간의 영향을 조사하기 위해 독립변수는 휴식 시간(1분, 2분, 3분, 4분, 5분)과 sub-maximal 상태의 힘 수준(25%, 50%, 75% MVC)을 정하였고, 그에 따른 회복효과를 평가하기 위한 매개변수로는 MPF(Median Power Frequency)를 사용하였다. MPF를 종속변수로 하는 2인자 3×5 Within-subject design을 계획하였고, 각 휴식시간은 랜덤하게 배치하여, 5회 신전운동을 반복적으로 실시하였고, 한번의 근육수축 후 바로 휴식시간을 갖도록 하였다.

2.4 실험절차

L1(Lumbar 1st Vertebrae)부분과 L3(Lumbar 3rd Vertebrae)부분의 Erector Spinae(ES)를 대상으로 좌-우, 4 channels의 표면전극을 그림 2의 위치에 부착하였다. 피실험자의 MVC를 측정하기 위하여 피실험자에게 선자세에서 3회에 걸쳐 5초

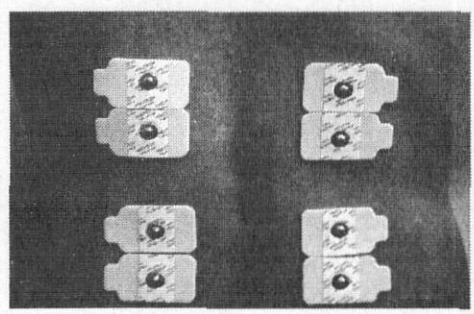

그림 2. Erector Spinae의 L1과 L3 좌·우 네 부위

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

간 최대의 근육힘을 발생시키도록 하였다. Sub-maximal 수축은 매회 20초 동안 등척성 신전(isometric extension)수축을 실시하도록 하였다. 각 근육수축 사이에 5수준의 휴식시간을 배치하여 한 수준당 각각 5회 반복 실시하였다.

2.5 분석방법

EMG시스템에 기록된 생체신호를 ASCII code로 변환한 후, MPF 값의 시간에 따른 추이를 분석하기 위하여 20초의 데이터를 1초 간격으로 20개 구간으로 나누었고, 각각을 1024-point FFT 변환을 실시하였다. 근전도를 이용한 피로분석 방법은 FFT(Fast Fourier Transform)를 통한 주파수 분석에서 얻어진 MPF값을 사용하였다(Basmajian and Luca, 1985). 각각의 값들은 피실험자들간의 오차를 보정하기 위하여, 초기 실험시 얻어진 MPF 값을 기준으로 정규화(normalization)하였다(Mirka, 1991).

$$\text{Normalized MPF} = \frac{AVR(\text{매회 측정된 } MPF_{t=18,19,20})}{AVR(\text{초기 실행시 얻어진 } MPF_{t=18,19,20})} \quad \cdots \text{식(1)}$$

식(1)과 같이 20초 동안 수집된 데이터에서 피로가 발생했을 가능성이 가장 높은 후반부의 3초간(18초, 19초, 20초)을 사용하였으며, 각 반복회수별, 휴식시간별 분산분석을 실시하였다.

분산분석에서 유의한 차이를 보이는 부위에 대하여는 Duncan test를 실시하였고, 5%의 유의수준을 사용하였다.

3. 결 과

그림 3은 50% MVC 수준에서 normalized MPF 값의 변화를 표현하였고, 그림 4는 75% MVC 수준에서의 normalized MPF 값의 변화를 나타내었다. 그림에서 시간축을

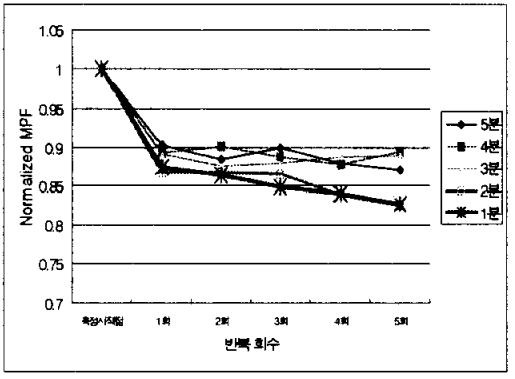

그림 3. 50%MVC MPF값의 변화
[L3 오른쪽 부위]

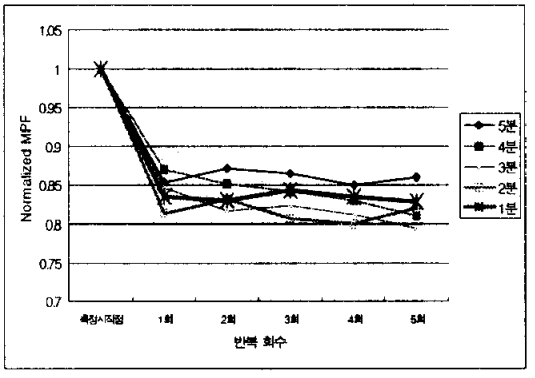

그림 4. 75%MVC MPF값의 변화
[L3 오른쪽 부위]

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

따라 지속적으로 하향하는 곡선은 반복적인 신전 근육 수축 작업에 의해 발생하는 피로의 증가를 의미하며, 대체적으로 수평을 그리는 선은 초기 피로상태가 유지되거나 피로 누적이 일어나지 않는 상태로 이해 할 수 있다. 이렇게 시각적으로 표현되는 변화가 과연 통계적으로 유의한 의미가 있는지를 살펴보기 위해 분산 분석 (ANOVA)을 실시하였다.

분산 분석은 L1, L3 좌우부위의 네 부위에서 각각 추출된 근전도 분석결과에 대해 실시하였고 표 1에 요약 되었다. 표 1에는 근육피로도가 전혀 나타나지 않았던 25% MVC 수준을 제외하고, 50%와 75% MVC 조건에서의 분산분석 결과를 표시하였고, 통계적 유의도를 표현하기 위해 p 값을 제시하였다. p 값의 수리적 정의는 ANOVA분석에서 나타난 F의 값을 정규화 시킨 것으로 식(2)와 같이 표현되고, p 값이 유의하게 나타났다는 것은 (일정 수준의 힘과 일정 휴식시간 조건에서) 피 실험자가 5회의 등척성 신전운동을 실시할 때, 근육피로 현상이 발생하고 있다는 것을 의미한다. 표 1에 나타난 p 값은 적을수록 귀무가설을 기각하기 쉬우므로, 예를 들어 p 값이 0.05 보다 적다는 것은 95% 신뢰도를 가지고 5회 반복 신전운동 중 피로의 변화가 발생했다는 것을 의미한다.

$$F = \frac{SS_{treatments}}{MS_{error}} \qquad \cdots \text{식(2)}$$

표 1에서, 50% MVC 수준에서 1분의 휴식시간을 가졌을 때는, 모든 측정부위에서 근육 피로현상의 차이가 유의하게 나타났다. 이는 반복 측정 중 근육피로도가 지속적으로 변화 또는 증가되는 현상으로 이해할 수 있다. 2분의 휴식시간에서는 피로도의 변화의 차이가 약간 둔화되었고, 3분의 휴식시간부터는 피로도 변화 현상이 거의 발견되지 않았다. 한편 75% MVC 수준에서는 1, 2 분의 휴식시간에서 피로도의 변화가 나타나지 않았는데, 이는 1회 측정 시 발생된 피로도가 2, 3, 4, 5 회 측정 시에도 그대로 유지되어졌다고 보여 진다. 또한, 75% MVC 수준에서는 3분 휴식시간에서 L3 근육에 피로도 증가 또는 감소로 생각되는 현상이 관찰되었다. 4분 휴식시간에서는 모든 측정부위에서 피로가 감지되었고, 이 경우는 1회 신전운동 시 발생했

표 1. %MVC와 휴식시간에 따른 근육피로도를 나타내는 분산분석 결과

Source	휴 식 시 간				
	1분	2분	3분	4분	5분
50%MVC (L1, 좌)	0.0116**	0.4747	0.2799	0.0614*	0.1935
50%MVC (L1, 우)	0.0029**	0.0721*	0.3033	0.7468	0.5586
50%MVC (L3, 좌)	0.0001***	0.0754*	0.9590	0.0910*	0.2702
50%MVC (L3, 우)	0.0005***	0.0293**	0.8247	0.4770	0.0627*
75%MVC (L1, 좌)	0.0822*	0.6302	0.2763	0.0002***	0.1930
75%MVC (L1, 우)	0.6884	0.6130	0.1292	0.0445**	0.2876
75%MVC (L3, 좌)	0.7777	0.7581	0.0241**	0.0015***	0.5820
75%MVC (L3, 우)	0.9240	0.3481	0.0411**	0.0157**	0.2734

(* p<0.1 수준에서 유의, ** p<0.05 수준에서 유의, *** p<0.01 수준에서 유의)

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

던 피로도가 증가 또는 감소현상을 보이는 것으로 해석되어질 수 있다.

ANOVA 결과에서 보이는 유의한 차이를 보다 자세히 판독하기 위해 Post-hoc test를 추가로 실시하였다. 이 분석은 반복 작업 시에 발생하는 피로도의 차이 유무를 판단할 수 있을 뿐 아니라, 이러한 통계적 차이의 크기를 평균값을 사용하여 서열을 매기고 그룹화 할 수 있다는 장점이 있다. 이를 위해, Duncan test를 통한 grouping을 실시하였고, 그 결과, 50% MVC 수준에서는 2분씩 휴식하며 4회 반복 신전운동 후 피로 누적현상이 우측 L1 부위에서 발생하는 것을 알 수 있었다. L3 부위에서도 이와 유사하게 2분식 휴식하며, 4 내지 5회 신전운동 후 누적피로효과가 나타난 것을 관찰할 수 있었다. 이것을 통해 ANOVA 분석에서 나타난 통계적 차이가 실제로 피로의 증가에 의한 것을 확증할 수 있었다. 한편, 75% MVC 수준에서 L1 부위를 보면 1회 신전운동 시 발생한 피로가 유지되었고, 4분씩 휴식하며 1, 2, 3회 신전운동 시에는 피로 누적 현상이 보이지 않다가 4 내지 5회 신전운동 후에야 피로 누적 현상이 관찰 되었다. 이 결과는 75% MVC 조건에서 4분씩 휴식하며 1, 2, 3회 신전운동 중에는 근육피로가 회복될 수 있으나, 그 이상의 신전운동이 계속되면 다시 피로가 누적되는 현상으로 이해할 수 있다. 5분씩 휴식 중에는 전반적으로 피로누적 현상이 관찰되지 않았다. L3 부위에서도 약간의 불규칙성이 관찰되었으나 대체적으로 이와 유사한 현상이 나타났다.

본 연구의 결과를 종합하여 볼 때, 근육에 따른 차이가 있으나 50% MVC 수준의 작업에서는 2 분의 휴식시간이 75% MVC 조건에서는 4분이 피로 누적 효과를 줄이기 시작할 수 있는 시점이 된다는 것을 관찰 할 수 있었다.

4. 토 의

현재 관찰된 피로누적 예방을 위한 휴식시간이 기존의 휴식시간과 어떠한 관계가 있는지를 알아보기 위하여, 상지 근육의 힘을 사용하여 계산한 경우를 살펴보았다. 예로, Rohmert(1973a, b)는 작업을 동적 근육 작업(dynamic muscular work)과 정적 근육작업(static muscular work)로 구분하여 상지 근육에 대해 최대 유지시간(maximum holding time)과 작업시간(loading time), 회복시간(recovery time)사이의 관계를 작업자의 힘과 유지시간을 이용하여 나타내었고, 자신의 모델에 의해 근육회복시간(Trec)을 구하였다. 계산식은 식 3 와 4에 표현되어 있고, 그 결과는 표 2와 같다.

$$T_{max} = \frac{126}{P} - \frac{36}{P^2} + \frac{6}{P^3} - 90 \quad \cdots \text{식 (3)}$$

$$\frac{T_{rec}}{T} = \frac{18(T)^{1.4}(P-0.15)^{0.5}}{T_{max}} \quad \cdots \text{식(4)}$$

Tmax = Maximum holding time(sec)
P = Applied Force/maximum force
Trec = Recovery time(min)
T = Loading time(min)

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

표 2. 힘을 이용한 회복 시간 산정

	50%	75%
P - Applied force/maximum force	0.5	0.75
Tmax - Max holding time(min)	1.1분	0.466분
T - Loading time(min)	0.333분	0.333분
Trec - Recovery time(min)	0.69분	2.12분

Rohmert가 제시한 경험적 관계모델에 의하여 50% MVC 수준의 경우 최대유지시간과 작업시간에 의한 회복시간 Trec는 0.69(min)이 됨을 알 수 있고, 75% MVC 조건에서는 회복시간 Trec는 2.12(min)이 됨을 알 수 있다. 그러나, 본 연구 결과, 50% MVC 수준의 등척성 신전 작업시 휴식시간이 2분 이내일 경우 근육피로가 발생하고, 75% MVC 수준의 작업에서는 휴식시간을 4분 이하로 주었을 때 근육피로가 발생할 수 있는 것이 관찰되었다. 그러므로 본 실험 조건하에서, 50% MVC 수준에서 최소한 3분 이상, 75% MVC 수준에서 최소한 5분 이상의 휴식시간을 주어야 이전의 신전운동으로 인한 피로가 누적되지 않는다는 결과를 알 수 있었다. 본 연구에서는 허리 근육을 사용한 반면, Rohmert의 연구에서는 상지 근육을 사용하였으므로, 근육의 크기와 근 섬유질 타입의 차이에 따른 피로회복도의 차이가 발생할 수도 있어 직접적인 비교의 어려움이 있으나, 기존의 근육의 힘을 근거로 산정한 적정 휴식시간이 국부 근육 피로도를 예방하는데 적절하지 않을 수 있다는 사실을 간과해서는 안 될 것이다. 또한, 현장에서의 근골격계 질환의 증가 추세와도 무관하지 않을 수 있다는 사실에 주목해야 할 것이다.

근육피로를 최소화하여 근골격계 질환 예방을 위한 작업계획을 수립하기 위해서는, 현장 상황에 가까운 근 피로도 실험과 본 실험의 결과를 뒷받침할 수 있는 유사한 연구들이 지속적으로 실행되는 것이 필요하다. 특히 반복적인 동적 근육 수축 상황에 대한 검토를 통해 본 연구에서 사용한 정적 근육 수축과의 차이를 이해하는 것이 보다 현실적인 근육피로 예방안을 제안할 수 있는 자료가 될 것이다. 추후 다양한 상황에서의 피로도 측정 자료들을 통해 근육피로를 예방할 수 있는 작업설계가 가능할 것으로 기대한다.

5. 결 론

본 연구는 요추의 누적근육피로에 따른 근골격계 질환 가능성을 예방하기 위한 기초 자료를 추출하기 위해 수행되었다. 이를 위해, 다양한 등척성 신전 작업 시 국부근육에 대한 피로 정도를 반복 횟수에 따라 측정하였고 이를 정량적으로 분석하였다. 본 연구의 결과에 따르면, 반복 작업 시 요통을 예방하기 위해서는, 근육 피로에 대한 새로운 생체 역학적 자료 수집이 절실하다. 본 연구는 근육피로 예방을 위해 현장의 작업-휴식시간의 개선

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

이 필요할 수도 있다는 것을 보여 주었다. 본 연구가 계기가 되어 추후 연구를 통한 다양한 적정 작업-휴식 cycle에 대한 제안들이 나올 것을 기대한다.

참고 문헌

정명철, 김정룡, 근전도의 정량적 분석시 사용되는 수리적 파라미터의 민감도 비교, 대한산업공학회지, 25(3), 330-335, 1999.

현수돈, 김정룡, High Heel이 허리 근육 피로에 미치는 영향에 관한 연구, 대한인간공학회지, 16(3), 37-48, 1997.

Price, A.D.F., Calculating Relaxation Allowances for Construction Operatives - Part 1 : Metabolic cost. Applied Ergonomics, 21(4), 318-324, 1990.

Price, A.D.F., Calculating Relaxation Allowances for Construction Operatives - Part 2 : Local muscle fatigue. Applied Ergonomics, 21(4), 318-324, 1990.

Basmajian, V., Luca C. J., Muscle Alive: Their Functions Revealed by Electroymyography; 5th ed., Williams & Wilkins, 1985.

Cornwall, M.W., Muscular Fatigue and Recovery Following Alternating Isometric Contractions at Different Levels of Force. Aviat Space Environ. Med., April 65(4), 309-14, 1994.

Hermans., Recovery of Muscular Effort After a Sustained Submaximal Task. Advances in Occupational Ergonomics and Safety, 1998.

Jeffrey R. Cram, Glenn S. Kasman, Introduction to Surface Electromyography. AN ASPEN Publication, 1998.

Kim, S. H. and Chung, M. K. Effects of Posture, Weight and Frequency on Trunk Muscular Activity and Fatigue during Repetitive Lifting Tasks, Ergonomics, 38(5), 853-863, 1995.

Kumar, S. and Narayan, Y., Fatigue of the Trunk Muscles in Isometric Trunk Rotation. In Proceeding of the Twelfth Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology, June 27-30, 156-157, 1998.

Mirka, G. A., The Quantification of EMG Normalization Error, Ergonomics, 34(3), 343-352, 1991.

Rohmert. W., Problems in Determining Rest Allowances Part I. Applied Ergonomics. November, 91-95, 1973a.

Rohmert. W., Problems of Determination of Rest Allowances Part II. Applied Ergonomics. November, 158-162, 1973b.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

저자 소개

◈ 김 정 룡

한양대학교 기계공학과를 졸업하고 미국 오하이오 주립대에서 인간공학 석·박사를 취득하였다. 현재 한양대학교 정보경영공학과 교수로 재직중이다. 관심분야는 척추생체역학, 근전도, 심리생체신호, 인체공학적 제품설계, 근골격계 질환 진단 및 예방 등이다.

논문접수일 (Date Received): 2002/01/09
논문게재승인일(Date Accepted): 2002/04/30

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.