

작업 중 휴식시간 변화에 따른 근육 누적피로도에 대한 연구

대한산업안전협회 인산지회 신현주 팀장

1. 서론

최근 산업현장에서는 기계 설비의 자동화 및 운반용 기계가구가 지속적으로 증가하는 추세에도 불구하고, 인력으로 중량물을 인양, 운반하는 작업으로 인한 허리 상해가 계속해서 증가하고 있다. 이로 인한 경제적 손실은 산업재해에서 커다란 부분을 차지하고 있고, 특히 근로손실 일수, 막대한 치료비용, 생산성 저하 등 피해의 심각성에 대하여 이미 많은 연구자들이 언급한 바 있다. 본 연구에서는 작업장에서 가장 빈번히 관찰되는 들고(lifting), 내리기(lowering) 작업을 대상으로 하여, 작업시 몸통 근육의 피로와 회복시간과의 상관관계를 살펴 보려고 한다. 특히 들고, 내리기 작업시 몸통부위의 주요활동 근육을 근전도(EMG:electromyogram)를 사용하여 정량적으로 측정 및 분석하고, 그 결과에 따라 누적피로를 최소화할 수 있는 작업 중 휴식 시간을 추정해 보는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 연구방법

2.1 실험 참가자

본 연구에서는 과거에 허리부위에 질병을 앓은 적이 없고, 근 골격계 질환과 관련된 과거의 병력이 없으며, 현재 건강 상태가 양호한 20대 대학생 10명을 실험참가자로 선정하였다. 실험참가자는 평균 나이 26.1세(표준편차 1.57)이고, 평균 키 174.3cm(표준편차 5.29), 평균 몸무게 69.3kg(표준편차 4.28)이다.

2.2 근육선정

동적 들기 작업(dynamic lifting tasks) 동안 실험참가자는 대칭(symmetric)자세, 비대칭(asymmetric)자세로 중량물을 들고, 내리기 작업을 수행해야 하기 때문에 굽힘(flexion), 펴(extension), 비틀림(twisting) 동작을 제어하는 몸통 부위의 10개 근육을 실험 대상으로 선정하였다.

2.3 실험장비

실험참가자의 근육 피로도를 측정하기 위한 실험장비는 너비 30cm, 깊이 30cm, 높이 25cm인 나무상자, 높이가 75cm인 책상, 등척성 신전 수축(Isometric Extension Contraction) 조건 하에서 몸통의 MVC를 측정하기 위하여 인체공학연구실에서 제

작한 ITEF(Isometric Trunk Exertion Frame)를 사용하였다.

등척성 신전 자세시 일정한 수준의 %MVC를 유지하기 위하여 Bongshin loadcell(500lb)를 연결하여 실험참가자가 발휘하는 근육힘의 크기를 육안으로 볼 수 있도록 loadcell과 Digital Indicator BS-300A를 연결하였다. 또한 몸통 근육의 신호를 추출하기 위하여 V91-93 표면전극(Surface Electrode)과 10 Channels의 High Gain Bioamplifier와 High Speed Video I/O Port를 장착한 Coulbom Instruments사의 EMG system를 PC와 연결하여 사용하였다. Videograph의 gain은 $\times 2500$, 저차단 주파수(Low Cutoff Frequency)는 1Hz, 고차단주파수(High Cutoff Frequency)는 1000Hz로 조절하였다. 신호치리를 위하여 PC와 Dataq Instruments사의 Windaq/200을 사용하였고, 일반적으로 근전도 주파수 대역은 400Hz 이하 이므로 Nyquist principle에 따라 1024Hz의 샘플링 주파수(Sampling Frequency)를 각 채널별로 사용하였다(Marras, 1987; Proakis and Manolakis, 1996).

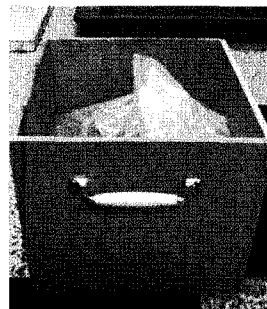


그림 1. Box for Experiment



그림 2. Digital Indicator

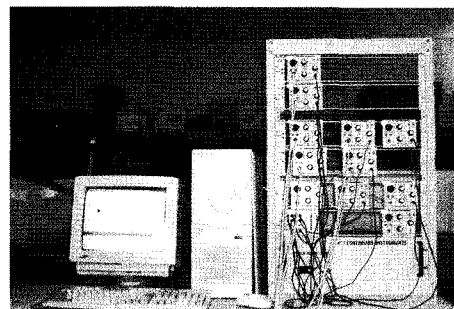


그림 3. EMG system with PC

3 실험설계

3.1 실험 가설

중량물을 들고, 내리기 작업에 의해 주로 동원(recruited)되는 몸통부위 근육을 대상으로 근육의 피로도에 관한 두가지 귀무가설(Null hypothesis)을 세웠다. 첫째는 “중량물 반복 취급 작업 시 휴식시간의 길이가 근육 피로도(fatigue)에 영향을 미치지 않는다”이고, 두번째는 “중량물 반복 취급 작업시 작업자세(대칭자세, 비대칭자세)가 근육 피로도(fatigue)에 영향을 미치지 않는다”로 설정하였다.

3.2 실험계획

중량물을 들고, 내리기 작업시 휴식시간이 근육피로에 미치는 영향을 정량적으로 연구하기 위하여 2개의 독립변수를 사용한 Within-Subject Design을 계획하였다. 독립변수로는 휴식시간(1분, 2분, 3분, 4분, 5분)과 자세(대칭, 비대칭)이고, 그에 따른 피로도와 회복여부를 평가하기 위해 MPF(Mean Power Frequency)를 종속변수로 사용하였다. 개개인의 실험참가자가 실시하는 실험 순서는 라틴방격법(Latin Square Design)을 이용하여 실시하였다.

3.3 MVC 측정

실험참가자의 MVC를 측정하기 위하여 ITTF 위로 올라가게 한 후, 발을 표시된 위치에 올려놓고 다리는 약간 구부리고, 팔은 쭉 뻗은 상태에서 등척성 신전(Isometric Extension)자세로 MVC를 측정하였다. 실험참가자는 3회에 걸쳐 MVC를 측정하였다.

MVC 측정 후, 누적 피로가 발생하지 않도록 각 시행마다 5분간의 휴식시간을 제공하였다. 그리고 매 측정시마다 Digital Indicator로 관찰하고, Peak MVC를 선택하여 이 값들의 평균을 구하고, 이 값을 각 실험참가자의 MVC로 사용하였다. 3번의 MVC 측정 후 근육의 피로회복을 위하여 10분간 휴식을 취하였다. 실험참가자가 시행했던 실험의 조건은 표 1, 표 2와 같다.

표 1 Experimental condition of Symmetry Posture

무게	자세	빈도수	작업시간	반복횟수	휴식시간 (Random Order)
25% MVC	대칭	4회/분	3분	3	1분
25% MVC	대칭	4회/분	3분	3	2분
25% MVC	대칭	4회/분	3분	3	3분
25% MVC	대칭	4회/분	3분	3	4분
25% MVC	대칭	4회/분	3분	3	5분

표 2 Experimental condition of Asymmetry Posture

무게	자세	빈도수	작업시간	반복횟수	휴식시간 (Random Order)
25% MVC	비대칭	4회/분	3분	3	1분
25% MVC	비대칭	4회/분	3분	3	2분
25% MVC	비대칭	4회/분	3분	3	3분
25% MVC	비대칭	4회/분	3분	3	4분
25% MVC	비대칭	4회/분	3분	3	5분

3.4 분석방법

EMG System에 기록된 생체신호를 Windaq Software를 사용하여 분석하였다. ITTF에서 75% MVC로 측정된 7초간의 Raw Data를 ASCII code로 변환한 후, 근육의 피로도를 분석하기 위하여 75% MVC를 비교적 잘 유지한 3초간을 분석 대상으로 적용하였다. 수집된 data는 각각을 1024-point FFT(Fast Fourier Transform)를 실시하였고, 근전도를 이용한 근육 피로도 변수로는 MPF값을 사용하였다(Kwanty, Tomas and Kwatng, 1970.) 각각의 값들은 실험참가자들의 개인차를 보정하기 위하여, 초기 실험시 얻어진 MPF 값을 기준으로 정규화(Normalization)하였다. Normalized-MPF(이하 N-MPF로 기술했다) 값들을 비교하기 위하여 SAS를 이용하여 분산분석을 실시하였다.

4. 결과

4.1 각 요인별 분산 분석 결과

각 요인에 따른 분산분석을 실시한 결과, 휴식시간(time), 근육간(muscle)에는 $p < 0.01$ 에서 유의한 차이가 나타났고, 자세에 대해서는 $p < 0.1$ 수준에서 유의성이 나타났다.

표 3 The result of Anova of each factors

Source	F Value	Pr>F
Position	3.64	0.0888*
Time	6.98	0.0003***
Muscle	13.52	0.0001***
Position×Time	0.97	0.4347
Position×Muscle	2.35	0.0207**
Time×Muscle	1.88	0.0024***
Position×Time×Muscle	1.07	0.3632

*p<0.1 유의수준 **p<0.05 유의수준 ***p<0.01 유의수준

표 4 Post-hoc Test of Muscle depending on the length of Time (DUNCAN Grouping)

자세	1분	2분	3분	4분	5분
LES	B C	C	B C	B A	A
RES	C	C B	C B	B	A
LRA	B	B	B	B A	A
RRA	B	B	B A	A	A
RIO	B C	C	B	B A	A

시간변화에 따른 근육별 분산분석 결과, 유의성이 나타난 근육에 대해 유의수준 5% 조건하에서 Post-hoc Test 를 실시하였다(표 4). 복직근 오른쪽 4분을 제외한 나머지 근육은 휴식시간 5분에서 유의한 차이가 나타났다. 이는 자세(대칭, 비대칭)에서 5분의 휴식시간을 제공시 다음 작업에 미치는 근육피로가 유의한 감소를 보일 수 있다는 것을 의미한다. 특히 척추 기립근 오른쪽의 경우에는 4분과 5분이 차이가 나타나는 것은 대칭자세와 비대칭 자세의 피로도 차이라고 할 수 있다.

4.2 대칭자세(Symmetric Posture)에서 분산분석 결과

대칭자세에서 휴식시간(1분, 2분, 3분, 4분, 5분)에 따른 분산분석을 실시한 결과, 각 근육에 대한 유의수준 5% 범위 내에서 10개의 근육 중 왼쪽 척추 기립근(LES:Left Erector Spinae)과 오른쪽 척추 기립근(RES:Right Erector Spinae), 왼쪽 복직근(LRA:Left Rectus Abdominis)과 오른쪽 복직근(RRA:Right Rectus Abdominis)에서 유의한 차이가 나타났다. 다른 근육들에서는 유의수준 5% 범위 내에서 유의성이 나타나지 않았다(표 5).

표 5 The result of Anova of each muscles depending on the length of Recovery time at symmetric posture

Source	F Value	Pr>F
LES	5.45	0.0016**
RES	3.15	0.0256*
LEO	1.85	0.1410
REO	1.80	0.1502
LLD	1.32	0.2810
RLD	0.13	0.9690
LRA	4.24	0.0065**
RRA	5.16	0.0022**
LIO	1.85	0.1402
RIO	1.99	0.1176

*p<0.05 유의수준 ** p<0.01 유의수준

대칭자세에서 휴식시간에 따른 각 근육별 분산분석 결과는 왼쪽 척추 기립근(LES)과 오른쪽 척추 기립근(RES), 왼쪽 복직근(LRA)과 오른쪽 복직근(RRA)이 대칭동작에 영향을 미치는 사실을 발견하고, 각 근육에 대해 유의수준 5% 조건하에서 Post-hoc Test를 실시하였다(표 6). 왼쪽 척추 기립근은 휴식시간 4분, 5분에서 차이가 나타났다. 이는 4분, 5분의 휴식시간을 제공하고 다음 작업을 수행시 근육피로가 유의하게 감소할 수 있다는 것을 의미하고, 1분, 2분, 3분의 경우에는 누적된 피로에 의해 다음 작업에 영향을 줄 가능성이 크다고 할 수 있다. 오른쪽 척추 기립근은 4분에서 Grouping이 중복되는데, 이러한 결과는 최소한 근육의 누적피로에 의한 상해를 방지하기 위해서는 4분 이상 휴식시간이 필요하고, 충분한 회복을 위해서는 5분 이상 휴식시간을 제공해야 다음 작업에 영향을 줄 가능성이 감소한다고 할 수 있다. 복직근도 휴식시간 4분, 5분에서 차이가 나타났는데, 4분, 5분의 휴식시간을 제공할 경우 다음 작업에 미치는 근육피로가 유의하게 감소 할 수 있다는 것을 의미하고, 1분, 2분, 3분의 경우에는 다음 작업에 영향을 줄 가능성이 크다고 할 수 있다. 전반적으로 대칭작업시 최소한 4분 이상의 휴식시간이 필요하다는 것을 알 수 있다.

표 6. Post-hoc Test depending on the length of recovery time at symmetric posture(DUNCAN Grouping)

대칭	1분	2분	3분	4분	5분
LES	B C	B C	B	A	A
RES	B	B	B	A B	A
LRA	B C	C	B C	A	A
RRA	B	B	B	A	A

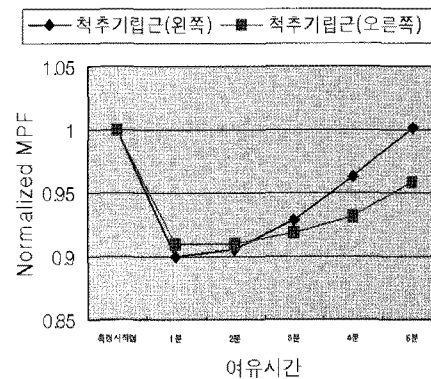


그림 1 MPF depending on the length of recovery time at symmetric posture (ESM)

그림 1은 척추 기립근의 대칭자세에서 휴식시간에 따른 75% MVC값의 변화를 나타낸 것인데, 왼쪽 척추 기립근의 경우 N-MPF값이 휴식시간 3분 미만에서는 피로회복에 대한 변화가 완만하게 나타나고 있으나, 3분 이후부터 급속히 빠른 속도로 회복되는 것을 알 수 있다. 왼쪽 척추 기립근의 경우에는 최소한 근육의 누적피로에 의한 상해를 예방하기 위해서는 3분이상이 필요하고, 초기 단계까지 회복을 위해서는 4분이상의 휴식시간이 필요한 것으로 나타났다. 오른쪽 척추 기립근은 4분까지는 피로회복의 속도가 완만하다가, 4분 이후 빠른 피로 회복현상을 나타내고 있어, 중량물 취급작업시 휴식시간은 4분이상이 되어야 누적피로에 의한 상해를 예방하고 빠른 회복이 가능한 것으로 나타났다.

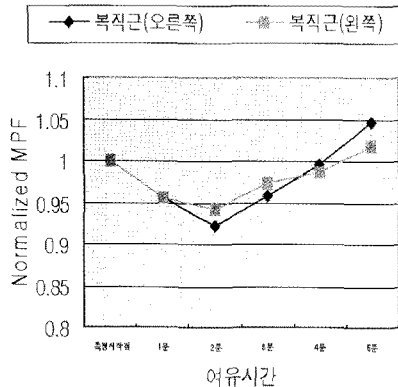


그림 2 MPF depending on the length of recovery time at symmetric posture (RAM)

그림 2는 복직근의 대칭자세에서 휴식시간에 따른 75% MVC 값의 변화를 나타낸 것인데, 3분 미만에서는 피로가 누적되어 초기 상태로 회복되지 않지만, 4분 이후로는 좌우측 모두 초기 상태까지 회복되는 것을 알 수 있다. 휴식시간이 4분 이상인 경우 N-MPF값이 측정시작점보다 높아진 것은 4분 이후부터는 근육의 동시활성화(coactivation) 현상에 의해 척추 기립근이 뚜렷한 피로회복을 보이면서, 복직근의 근육 동원부담이 경감하여 나타난 결과라고 할 수 있다.

4.3 비대칭자세(Asymmetric Posture)에서 분산 분석 결과

비대칭자세에서 휴식시간(1분, 2분, 3분, 4분, 5분)에 대한 분산분석을 실시한 결과, 각 근육에 대한 유의수준 5% 범위 내에서 10개의 근육 중 척추 기립근 왼쪽과 오른쪽, 복직근 오른쪽, 내복사근 오른쪽에서 유의한 차이가 나타났다. 좌우 외복사근, 좌우 활배근, 왼쪽 복직근, 왼쪽 내복사근에서는 유의수준 5% 범위내

에서 유의성이 나타나지 않았다(표 7).

표 7 The result of Anova of each muscles depending on the length of Recovery time at Asymmetric posture

Source	F Value	Pr>F
LES	4.67	0.0039**
RES	2.64	0.0494*
LEO	1.41	0.251
REO	0.26	0.9002
LLO	0.28	0.8889
RLD	1.50	0.2235
LRA	0.53	0.7167
RRA	2.84	0.0392*
LLO	1.30	0.2869
RIO	2.73	0.0441*

*p<0.05 유의수준 **p<0.01 유의수준

표 8 Post-hoc Test depending on the length of recovery time at Asymmetric posture(DUNCAN Grouping)

비대칭	1분	2분	3분	4분	5분
LES	B C	B C	B	B	A
RES	B	B	B	A B	A
RRA	B	B	B	A B	A
RIO	B	B	A B	A	A

비대칭자세에서 휴식시간에 따른 각 근육별 분산분석 결과, 왼쪽 척추 기립근(LES)과 오른쪽 척추 기립근(RES), 오른쪽 복직근(RRA)과 오른쪽 내복사근(RIO)이 비대칭동작에 영향을 준다는 사실을 발견하고, 각 근육에 대해 유의수준 5% 조건하에서 Post-hoc Test를 실시하였다(표 8). 척추 기립근은 휴식시간 5분에서 차이가 나타났다. 이러한 결과는 5분의 휴식시간을 제공시 다음 작업에 미치는 근육피로가 유의한 감소를 보일 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 1분, 2분, 3분, 4분의 경우에는 다음 작업에 영향을 줄 가능성이 매우 크다는 것을 의미한다. 오른쪽 복직근의 경우도 휴식시간 5분에서 차이가 나타났는데, 5분의 휴식시간을 제공 후 다음 작업을 수행할 경우 피로가 유의하게 감소할 수 있고, 4분미만의 경우에는 다음 작업에 영향을 줄 가능성이 매우 크다고 할 수 있다. 오른쪽 내복사근은 휴식시간 4분에서 차이가 나타났는데, 이러한 결과는 4분 이상의 휴식시간을 제공해야 다음 작업에 미치는 근육피로가 유의하게 감소를 보일 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 3분 미만의 경우에는 다음 작업에 영향을 미칠 가능성이 크다는 것을 의미한다. 몸통부위를 왼쪽으로 비트

는 동작에서는 좌우 척추 기립근, 오른쪽 복직근, 오른쪽 내복사근이 주동근(agonist) 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

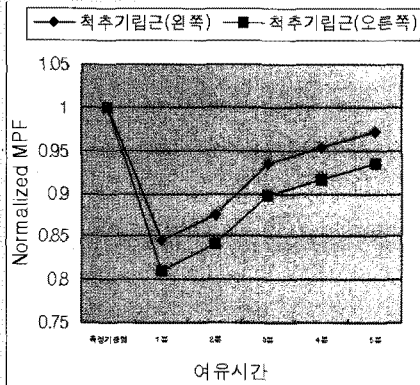


그림 3 MPF depending on the length of recovery time at Asymmetric posture (ESM)

그림 3은 척추 기립근의 비대칭자세에서 휴식시간에 따른 75% MVC값의 변화로서, 왼쪽으로 몸을 비틀(twisting) 경우, 오른쪽 근육이 왼쪽 근육에 비하여 누적피로가 더 많이 발생한 것으로 나타났다. 좌우측 척추 기립근의 경우, 휴식시간의 변화에 따라 근육의 피로회복이 빠르게 나타나고 있으며, 휴식시간 5분의 경우에 왼쪽 척추 기립근은 97% 정도의 회복율을 보이고 있지만, 오른쪽 척추 기립근은 94% 정도의 회복율을 보여 좌우측 근육의 피로도를 고려하였을 때 최소한 5분 이상의 휴식시간이 필요한 것으로 나타났다.

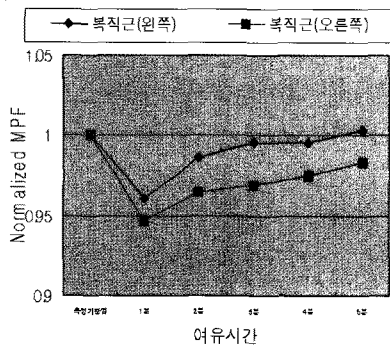


그림 4 MPF depending on the length of recovery time at Asymmetric posture (RAM)

그림 4는 복직근의 비대칭자세에서 휴식시간에 따른 75% MVC값의 변화로서, 왼쪽 복직근은 3분 이후 피로회복이 거의 초기 상태까지 회복되었으나, 주동근인 오른쪽 복직근은 휴식시간이 5분 일때, 98% 정도의 회복율을 보여 최소한 5분 이상의 휴식시간이 필요한 것으로 나타났다.

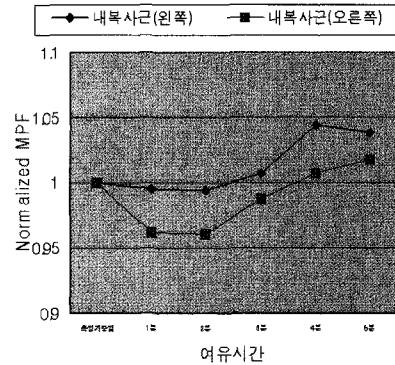


그림 5 MPF depending on the length of recovery time at Asymmetric posture (IOM)

그림 5의 내복사근에서는 비대칭자세에서 휴식시간에 따른 75% MVC값의 변화로서 왼쪽 내복사근은 3분 이후 초기 상태보다 N-MPF 수치가 높아지는 경향을 보이고 있고, 오른쪽 내복사근의 경우에는 휴식시간 3분에서 99% 정도의 회복율을 보이다가 4분 이후에는 초기 상태보다 N-MPF 수치가 높아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 3분 이전까지는 척추 기립근과 복직근의 근육부담이 가중되면서 내복사근의 피로도가 회복이 되지 않지만, 4분 이후에는 척추 기립근과 복직근이 회복이 되면서 내복사근의 근육 동원이 줄어들어 나타난 결과라고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 중량물을 취급하는 들고 내리기 작업을 현장과 비슷한 상황으로 실험실에서 재현하여 동적자세(대칭자세, 비대칭자세)로 반복작업을 실시하였고, 몸통부위 근육의 누적피로에 따른 근골격계 질환을 예방하기 위한 작업-휴식시간 설계를 위해 필요한 실험자료를 수집하였다.

본 연구에서는 몸통부위 10개 근육을 대칭자세와 비대칭자세로 구분하여 분석을 실시하여, NIOSH 'Lifting Equation'이 제시하는 회복시간과 비교하였고, Rohmert의 정적 근육피로회복시간 추정식과도 비교하였고, 근육피로를 고려한 예상 회복시간이 기존의 추정시간보다 다소 길게 나타났다. 이러한 결과는 추후 누적외상성 질환을 예방하기 위한 작업설계에 적용 될 수 있는 의미 있는 결과로 판단된다.

추후 본 연구와 같은 동적 반복작업에 대한 다양한 결과의 연구자료가 축적이 되면 산업현장에서 적용할 수 있는 중량물 취급 작업시 적정 휴식시간의 표준을 마련할 수 있을 것으로 기대한다. ☺