Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 18, No. 2 1999, 8

반복적인 손목 및 손가락 작업에서의 수작업 부하 평가

Evaluation of manual workload in repetitive wrist and finger motion

권 오 채*, 윤 명 환*

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the manual workload in repetitive wrist and finger motion. To evaluate manual workload, angular displacement of the joint, EMG of the muscle and subjective rating were studied. Both wrist motion and finger motion were studied. A screw-driving task was used for the wrist motion experiment. A keyboard typing task was used for the finger motion experiment. All finger joint angles and wrist angles were measured by an angle-measuring glove(CyberGlove™, Virtual Technologies, Inc.). Surface EMG was recorded from FCU muscle and FDS muscle simultaneously with the angle measurement. Subjective ratings of exertion were also recorded using the modified Borg's CR-10 scale. Repetition rates of 0.5, 1, 2 motions per second were used with each task. As a result, manual workload increased with increasing repetitiveness. Peak spectral magnitude and frequency components corresponded closely with joint angular displacement amplitudes and repetition rates. Results of the correlation analysis showed that there were significant correlation among EMG, frequency-weighted motion and subjective measurement. Both EMG and frequency-weighted filtering showed consistent workload estimation with increasing task frequency. Subjective ratings showed slight over-estimation of the workload as the task frequency is increased.

* 포항공과대학교 산업공학과

1. 서 론

최근 여러 산업분야에서 자동화가 급격히 증가하고 있음에도 불구하고, 과학이 고도로 발달된 나라에서도 산업현장이나 일상생활에서의 수작업은 널리 행해지고 있는 실정이다. 미국의 경우, 전체 작업자의 약 90%가 수공구를 이용한 수작업에 의존하고 있으며(Yun, 1994), 최근 로보틱스(Robotics)나 가상현실(VR Technology)분야에서도 수작업에 관련된 부분이 70%가 넘는 것으로 알려져 있다. 이러한 수작업을 주로 수행하는 산업현장에서의 주요한 관심사는 매년 발생하는 높은 비율의 손과 관련한 상해를 줄이는 것이다. 실제로 스웨덴 통계에 따르면 직업성 상해에서 손가락, 손, 손목이 포함된 사고가 32%에 달한다고 한다(Mital & Kilbom, 1992). 이러한 직업성 상해 중 누적외상병(Cumulative trauma disorders, CTDs)은 신체의 반복적인 동작이나 과다한 움직임으로 인한 질병이며, Carpal tunnel syndrome(CTS)은 손과 손목부위에 발생하는 가장 일반적인 누적외상병이다. 누적외상병을 비롯한 손목과 관련된 산업재해의 대부분은 동작 시 과다한 힘의 사용이나 극단적인 관절의 움직임 그리고, 동일한 동작의 잦은 반복 등에 그 원인이 있다(Cannon et al., 1981; Putz-Anderson, 1988). 이에 주 위험요인(risk factor)인 반복성에 대한 연구는 필수적이라 할 수 있다.

이에 많은 분석 방법들이 수작업의 반복성을 평가하는데 사용되어졌다. Radwin & Lin(1993)은 스펙트럼 분석(spectral analysis)을 이용하여 반복적으로 행해지는 수작업을 정량화 하였고, Radwin et al. (1994)은 빈도수-가중치 필터(frequency-weighted filter)를 설계하여 반복적인 수작업의 인체역학적 스트레스를 정량적으로 평가하였다. 또한 반복적인 수작업과 관련된 물리적 스트레스를 정량적으로 평가함에 있어 많은 양의 인체역학적 데이터를 하나의 metric으로 감소시켰다.

하지만, 이들 연구는 power grip에서 중심위치(neutral position)로부터의 손목 굴전 동작에 한정되었다. 따라서, 다른 grip 자세나 기타 손목 동작에서의 작업은 전혀 고려되지 않았다. 그리고, 일반 수작업이 손목만으로 이루어지지 않는다는 점을 감안하면 손의 다른 관절들에 대한 고려 또한 필수적이라 할 수 있다. 또한 이들 연구에서 사용된 빈도수-가중치 필터는 설계 모수(parameter)로 피실험자의 주관적 불편도를 사용하였다. 주관적 불편도가 주관적인 척도라는 점을 감안할 때 정량적인 척도를 설계함에 있어 부족함이 있으며, 빈도수-가중치 필터 설계방법의 난점도 고려하여 볼 필요가 있을 것이다. 이에 본 연구의 목적을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 반복성을 고려한 수작업의 부하를 평가함에 있어 손목의 굴전/신전 각도 뿐만이 아니라 손가락 여러 관절의 굴전/신전 각도나 손목의 요골/척골 편향 각도의 변위까지 고려해야 하는 실제 수작업을 측정·분석한다. 둘째, 반복성을 고려한 각변위의 크기를 평가하기 위하여 기존에 설계된 빈도수-가중치 필터와 일반적으로 많이 사용되는 버터워드 필터의 필터링 효과를 비교·분석한다. 셋째, 반복성을 고려한 수작업의 평가에 사용된 객관적인 척도(관절각도, EMG)와 주관적인 척도(주관적 평가) 등을 이용하여 여러 척도들의 유의성을 비교·검증하고, 상호간의 상관관계를 분석한다.

2. 이론적 배경

인체역학적 데이터를 평균값이나 RMS값으로 나타내는 것은 빈도수(frequency)에 대한 정보를 잃어버린다는 문제가 있다. 그림1은 동일한 RMS 입력진폭(input amplitude)을 가진 사인(sine)

곡선이 고역통과 필터를 통과하면 빈도수(frequency)가 증가함에 따라 RMS 출력진폭(output amplitude)이 증가한다는 관계를 묘사하고 있다(Radwin et al., 1994). 게다가 고역통과 필터의 차단 주파수(cut-off frequency)와 기울기(slope)가 동일한 물리적 스트레스 반응을 가지는 빈도수(frequency)와 진폭(amplitude)의 다른 여러 가지 조합으로 입력(input)에 대해 동일한 출력(output)값을 설계할 수 있다면, 출력 RMS값은 동일한 물리적 스트레스 수준과 일치할 것이다. 이러한 개념은 그림2에서 RMS 입력진폭은 감소하지만 빈도수가 증가하는 사인곡선이 고역통과 필터를 통과하면 동일한 RMS 출력진폭을 가지는 관계를 도표(diagram)로 표현하여 나타내고 있다(Radwin et al., 1994).

빈도수-가중치 필터(frequency-weighted filter)는 동일한 수준의 불편도함수에 비례하는 빈도수(frequency)에 의해 자세신호(postural signal)에 대한 가중치를 주므로, 필터링된 각도 데이터는 동작과 반복성을 고려한 상대적인 불편도를 나타낸다(Lin & Radwin, 1998). Radwin et al. (1994)은 빈도수-가중치 필터 설계에 사용된 모수(parameter)로 변위의 진폭(amplitude)과 빈도수(frequency)가 다른 반복작업으로부터의 주관적 불편도를 사용하였다. 이 빈도수-가중치 필터는 반복적인 작업의 물리적 스트레스를 평가하였으며, 반복성과 변위를 고려한 하나의 척도(metric)로 인체역학적 데이터를 감소시켰다.

Raw 데이터를 정류(rectification)한 EMG데이터는 필터링 과정을 거쳐야 하는데, 이는 raw 데이터에 포함되어 있는 잡음(noise)을 제거하는 작업이다. 본 연구에서는 EMG 데이터의 필터링을 위해 버터워드 저역통과 필터를 사용하였으며, 필터링 시에 일어날 수 있는 위상이동(phase

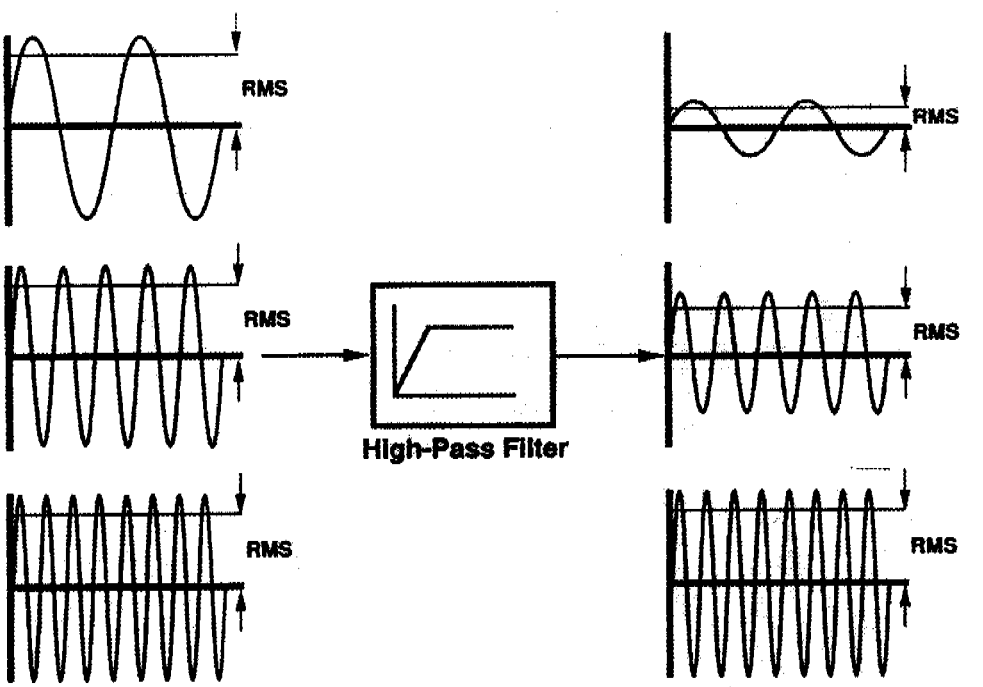


그림1 Frequency와 RMS의 관계 (Radwin et al., 1994)

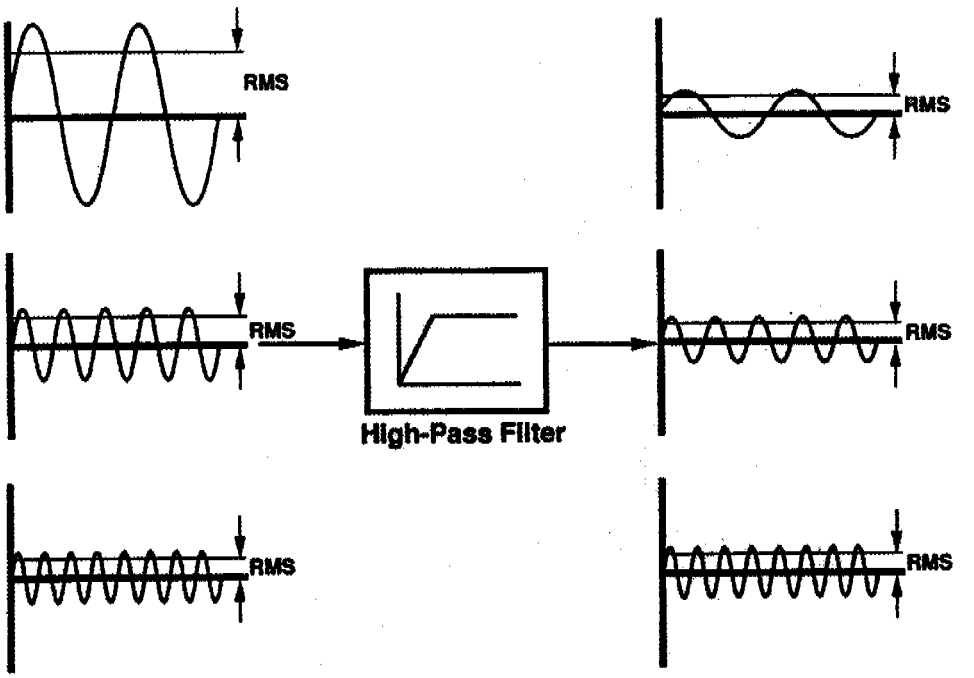


그림2 Frequency & amplitude와 RMS의 관계 (Radwin et al., 1994)

shift)을 방지하기 위해, 정방향 2차필터(forward 2nd order filter)와 역방향 2차필터(reverse 2nd order filter)를 합친 형태를 사용하였다. 필터링에 필요한 차단 주파수(cut-off frequency)는 여러 번의 반복 작업을 통해 설정하였다. EMG 신호는 저역통과 필터를 거치게 되면 출력 신호가 평탄해지고 지연되며, 만일 필터의 형태와 차단 주파수(cut-off frequency)가 적절하다면 결과로 도출된 Linear Envelope profile은 근육장력(muscle tension)과 유사할 뿐만 아니라 실제로 많은 연구에서 근육장력의 예측치로 사용되었다(Calvert & chapman, 1977; Winter & Yack, 1987). 특히, 수공구의 도움으로 발생된 힘은 등척성 근육수축의 결과이며(Mital, 1986), 등척성 수축동안에는 EMG와 근육장력의 크기 사이의 관계도 잘 정의되어 있다. 즉, 근력(muscle force)과 Linear envelope 사이에는 등척성 수축동안 밀접한 상관관계가 존재한다(Calvert & chapman, 1977; Winter & Yack, 1987).

필터링을 거친 데이터는 피실험자간 혹은 조건간의 비교를 위하여 정규화(normalization)과정을 수행하여야 한다. 본 연구에서 사용한 EMG 정규화는 다음 수식을 사용하여 수행되었다. 이 수식에서는 EMG를 정규화하기 위하여 최대근력을 발휘할 때의 EMG(max EMG)와 외부에서 힘을 가하지 않고 자세를 유지할 때의 EMG(rest EMG) 신호를 측정하여 사용하였다.

$$Normalized\ EMG(t) = \frac{EMG(t) - EMG_{rest}}{EMG_{max} - EMG_{rest}} \quad (1)$$

where, Normalized EMG(t) = normalization value

EMG_{max} = value at maximum condition

EMG_{rest} = value at rest condition

이때, max EMG와 rest EMG는 근육으로부터 3초간 측정된 raw EMG신호를 정류된EMG

신호로 정량화 시킨 후 3초 동안의 평균값(mean EMG)으로 선정하였다. 정규화된 EMG는 최종적으로 Root-mean-square(RMS)값과 적분값으로 표현되었다. Root-mean-square(RMS)는 시간과 힘에 의존하는 모수를 수학적으로 표현한 것으로 신호에서의 전기적인 파워를 측정하는 정량적인 값으로 사용되며, 수식으로 표현하면 다음과 같다(Basmajian et al., 1985).

$$RMS\{m(t)\} = \left(\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} m^2(t)dt\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

IEMG는 가장 보편적인 EMG 수치의 하나이며, linear envelope EMG 분석에 사용된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I\{|m(t)|\} = \int_{0}^{t}|m(t)|dt \quad (3)$$

본 연구에 사용된 EMG데이터의 전반적인 신호처리(signal processing)과정을 순서도(flowchart)로 나타낸 것이 그림3이다.

주관적 평가 방식은 가장 간편한 측정 방법으로서 피실험자가 작업부하 정도를 잘 구분할 수 있다는 전제하에 측정하는 방법이다. 최근의 연구들을 보면 불편도나 RPE(rating of perceived exertion)를 측정하는 주관적 평가 방식으로 Borg's 10-point category scale(Borg, 1982)을 주로 사용하였으며(Johnson & Childress, 1988; Freivalds & Eklund, 1993), Modified

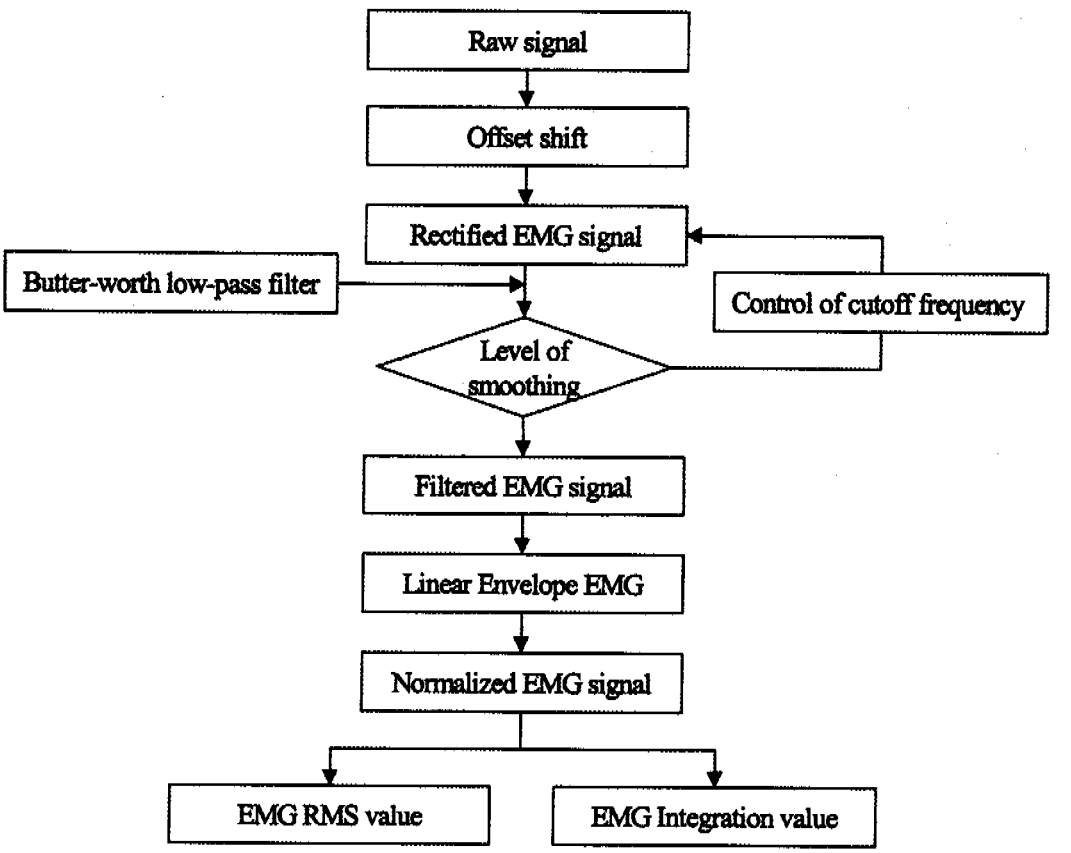


그림3 Flowchart of EMG signal processing

10	Extremely strong(almost max)
9	
8	
7	Very strong
6	
5	Strong
4	
3	Moderate
2	Weak
1	Very weak
0.5	Extremely weak(just noticeable)
0	Nothing at all

그림4 Modified Borg's CR-10 rating scale (Borg, 1990)

Borg's CR-10 rating scale(Borg, 1990)을 사용한 연구도 있었다(Kihlberg et al., 1993). 본 연구에서의 주관적 평가 척도로는 그림4와 같은 Modified Borg's CR-10 rating scale(Borg, 1990)을 사용하였다.

3. 연구 방법

본 연구에 참여한 피실험자는 손과 팔 등에 관련한 병력이 없고, 주로 오른손을 사용하는 남자 대학생 및 대학원생 6명으로, 키보드의 한글자판을 숙지하고 있었으며, Screw-driver 등의 수공구를 사용한 경험이 있었다. 피실험자 6명의 자세한 정보는 표1과 같다.

본 연구에서는 작업의 반복성을 고려하기 위하여 반복빈도수를 0.5Hz, 1Hz, 2Hz로 각각 조절하여 작업을 수행하였으며, 관절 각도와 근육 EMG 그리고, 작업부하에 대한 주관적 평가가 측정되었다. 관절의 각도 데이터는 각도 측정 시스템(Cyberglove™ system)을 이용하였으며, 타이핑 작업의 경우에는 손가락관절에 대한 순수한 변위를 계산하기 위하여 타이핑 초기자세에서의 관절 각도데이터 측정이 선행되었다. EMG데이터는

표 1. 피실험자 정보

	평균	표준편차	최소	최대
연령(세)	24.17	1.33	22	26
신장(cm)	173.5	5.47	169	181
체중(kg)	62.5	5.67	54	67.5
손길이(cm)	18.37	0.83	17.1	19.6
손바닥길이(cm)	10.52	0.57	9.7	11.2
손목너비(cm)	3.28	0.10	3.1	3.4
손목두께(cm)	5.02	0.15	4.8	5.2

표 2. 손목 및 손가락운동 실험 방법 비교

구분	손목운동 실험	손가락운동 실험
수행작업	● Screw-driving task	● Keyboard typing task
각도 측정 관절	● Wrist F/E ● Wrist R/U deviation	● MCP & PIP joint(excluding thumb) ● Wrist F/E
EMG 측정 근육	● FCU(Flexor carpi ulnaris)	● FDS(Flexor digitorum superficialis)

표 3. Coefficients for the frequency-weighted filter (Lin & Radwin, 1997)

k	bk	k	bk	k	bk	k	bk	k	bk
0	0.0012	5	-0.0155	10	-0.0877	15	-0.0742	20	-0.0072
1	0.0009	6	-0.0272	11	-0.0967	16	-0.0582	21	-0.0023
2	0.0000	7	-0.0419	12	0.8987	17	-0.0419	22	-0.0000
3	-0.0023	8	-0.0582	13	-0.0967	18	-0.0272	23	0.0009
4	-0.0072	9	-0.0724	14	-0.0877	19	-0.0155	24	0.0012

EMG 측정 시스템(Polygraph system, NEC San-ei instruments, Ltd.)을 이용하여 측정하였으며, EMG 신호의 정규화를 위하여 rest EMG와 maximum EMG가 각각 측정되었다. 그리고, 실험 시 각 작업간에는 대략 1분간의 휴식을 가졌으며, 이전작업에 대한 피실험자의 주관적 평가를 수행하였다. 표2는 손목 및 손가락운동 실험에서의 수행작업과 관절각도 및 EMG 측정 부위를 나타낸다.

실험을 통해 측정된 각도 데이터는 데이터 처리 과정을 통해 최종 3종류의 RMS값을 도출하게 되는데, 손목운동 실험에서의 2개의 관절 각도 데이터와 손가락운동 실험에서의 9개의 관절각도 데이터는 유사한 처리과정을 거치게 된다. 먼저 손목운동 실험의 경우, 중립 위치(neutral position)로부터의 각변위를 사용하므로 특별한 보정(calibration) 과정을 필요로 하지 않지만, 손가락운동 실험의 경우에는 작업을 통해 측정된 관절각도 데이터가 키보드 타이핑 작업의 초기자세에 대한 각변위라는 점을 착안하여 초기자세 데이터에 대한 보정(calibration) 과정을 수행하였다. 다음으로 관절 각도 데이터는 간단한 스펙트럼 분석(spectral analysis)을 위하여 푸리에 변환(Fourier Transform)을 수행하였다. 그 후 raw 데이터 전체 각변위 크기에 대한 값을 RMS로 나타내는데, 이를 위해 각 관절 각도 데이터들의 RMS값을 계산한 후 그 값들의 합으로 전체 RMS값을 계산하였다. 뿐만 아니라 전 장에서 설명한 고역통과 필터의 개념을 도입하여 데이터를 두 종류의 방법으로 필터링을 수행하였다. 첫번째는 Lin & Radwin(1997)이 제시한 빈도수-가중치 필터 계수를 사용한 필터링이며, 두번째는 일반적으로 가장 많이 사용하는 버터워드 필터을 사용한 필터링이다. 표3은 본 연구에 사용된 빈도수-가중치 필터 계수를 나타낸다. 이러한 두 종류의 필터를 거친 데이터들은 raw 데이터와 동일한 방법으로 전체 RMS값을 계산하였다. 그림5는 본 연구에 사용된 관절각도 데이터의 처리과정을 순서도(flowchart)로 나타낸 것이다.

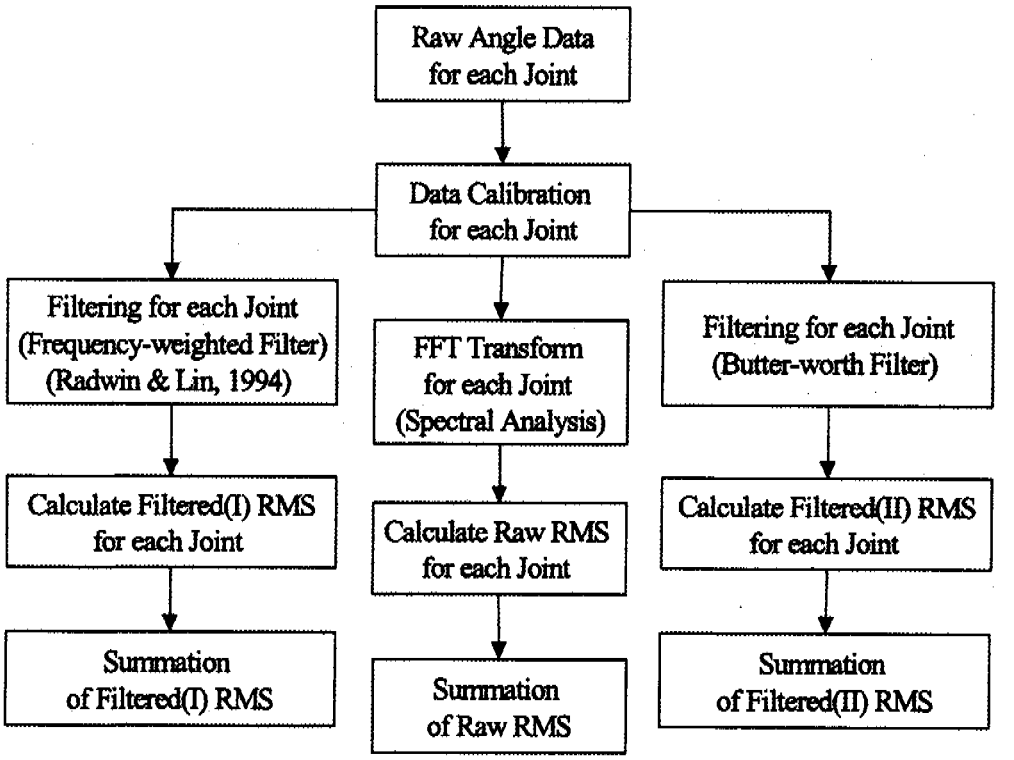


그림5 Flowchart of joint angle data processing

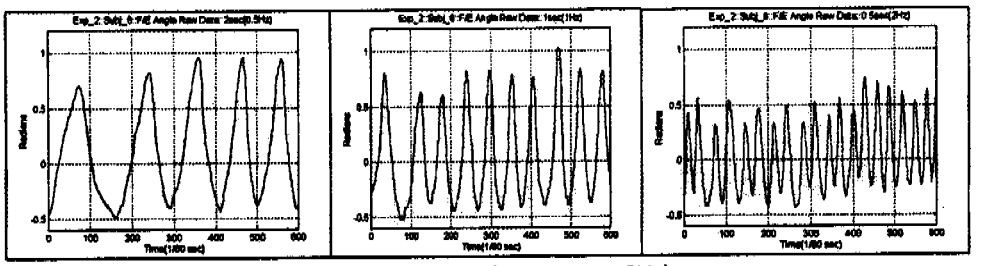
4. 연구 결과

손목운동 실험

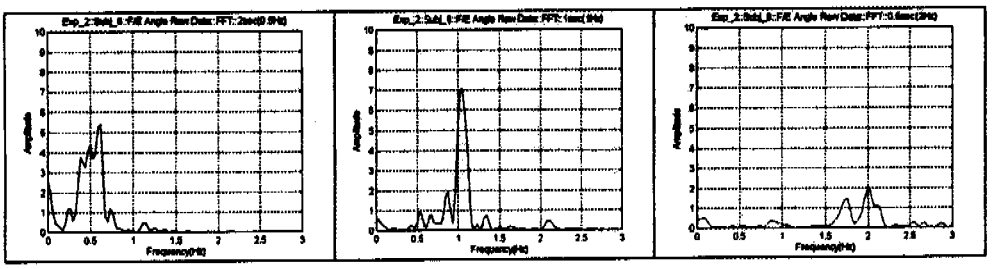
본 절에서는 손목운동 실험의 Screw-driving작업을 통해 측정된 관절각도 데이터와 EMG 데이터 및 주관적 평가 데이터의 처리결과를 서술하였다.

그림6은 본 실험에서의 각도 데이터 처리과정 중 손목관절의 굴전/신전 각도 raw 데이터와 FFT 변환 결과를 예시하고 있다. 그림6 (a)는 시간영역(time domain)에서 반복속도에 따라 작업주기와 각변위의 차이를 보여주고 있으며, (b)는 주파수영역(frequency domain)에서 반복속도에 따라 작업 빈도수에 해당하는 주파수에서 높은 진폭(amplitude)를 나타내고 있다. 따라서, 본 실험에서 수행된 Screw-driving작업은 동일한 동작의 반복에 의해 수행되는 작업의 특성상 반복속도에 의한 영향을 명확하게 나타내고 있음을 알 수 있다.

이상의 raw 데이터 처리와 더불어 수행된 두 종류의 필터링 결과, 필터링된 데이터 RMS값들은 반복속도에 따라 피실험자마다 차이가 없었지만, raw 데이터의 경우에는 다양한 경향을 나타내고 있었다. 본 연구에 사용된 버터워드 필터의 차수는 2차였으며, 차단 주파수(cutoff frequency)는 1Hz로 선정하였다. 버터워드 필터를 이용한 필터링에서 차단 주파수(cutoff frequency)의 영향을 알아보고자 차단 주파수(cutoff frequency)를 1Hz이외에 0.1Hz,



(a) Time Domain(0.5Hz, 1Hz, 2Hz)



(b) Frequency Domain(0.5Hz, 1Hz, 2Hz)

그림6 손목운동 실험 F/E Raw Data Plot (예:피실험자6)

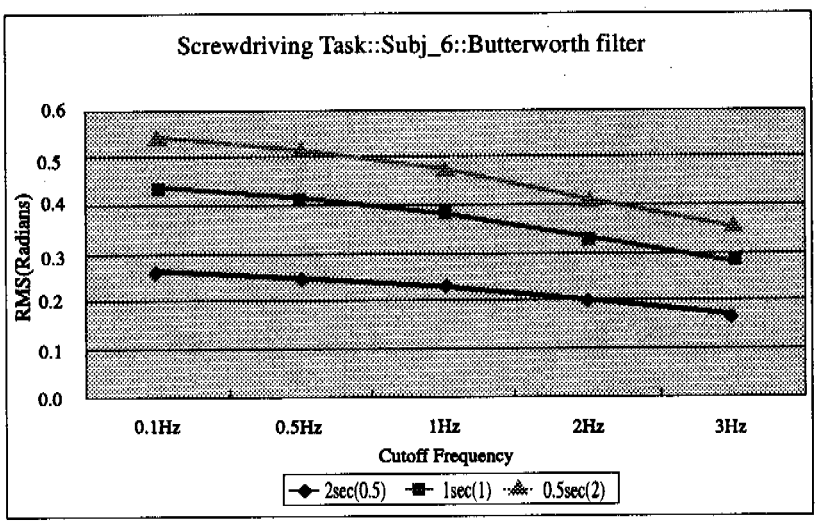
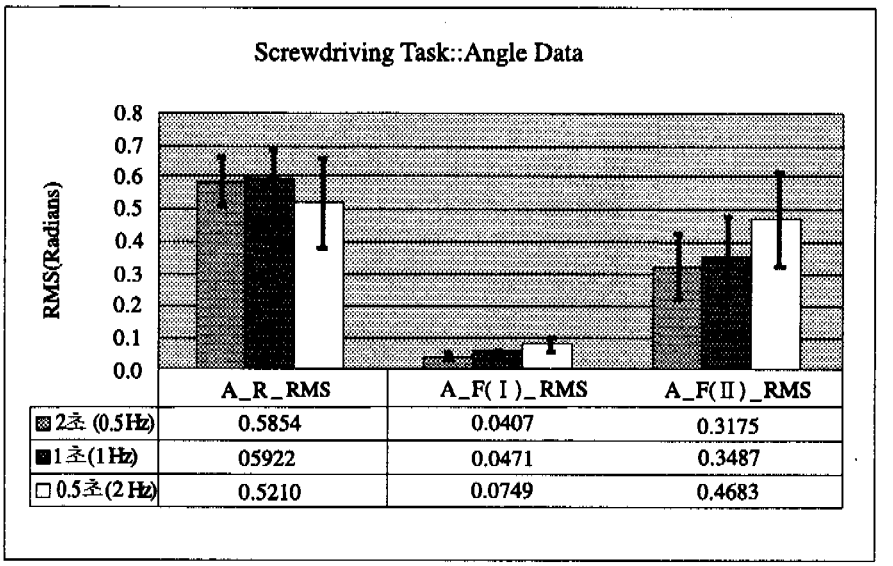


그림7 손목운동 실험 Butterworth filtering 차단주파수별 결과 (예:피실험자6)

0.5Hz, 2Hz, 3Hz 등으로 조절하여 필터링을 수행하였다. 그 결과, 그림7에 나타난 바와 같이 반복속도에 따른 RMS값 크기의 변화 경향에는 차이가 없었다.

그림8은 손목운동 실험의 관절각도 데이터 처리 결과를 피실험자의 평균으로 나타낸 것이다. 본 실험에서의 raw RMS값은 반복속도가 증가함에 따라 증가하는 필터링된 RMS값과는 달리 반복속도에 대한 영향을 받지않고 있다.

본 실험에서 측정된 FCU(flexor carpi



	A_R_RMS	A_F(Ⅰ)_RMS	A_F(Ⅱ)_RMS
2초 (0.5Hz)	0.5854	0.0407	0.3175
1초(1Hz)	05922	0.0471	0.3487
0.5초(2Hz)	0.5210	0.0749	0.4683

그림8 손목운동 실험 각도 RMS 처리결과

ulnaris) 근육의 EMG 데이터 처리과정을 나타낸 것이 그림9이다. 그림9의 (a)는 측정데이터의 raw 데이터를 나타내고 있으며, (b)는 (a)의 raw 데이터를 완전 정류(full-wave rectification)시킨 결과이다. 그림9의 (c)는 정류된 데이터를 버터워드 저역통과 필터를 사용하여 필터링을 수행한 결과인데, 필터링에 사용된 필터의 차수는 2차였으며, 차단 주파수(cutoff frequency)는 3Hz로 선정하였다. 이때 3Hz라는 차단 주파수는 필터링 과정을 여러 번 수행한 후 평탄화(smoothing)에 가장 적절하다고 판단되는 주파수로 선정된 값이다. 마지막으로 그림9의 (d)는 (c)의 데이터를 정규화한 결과이다.

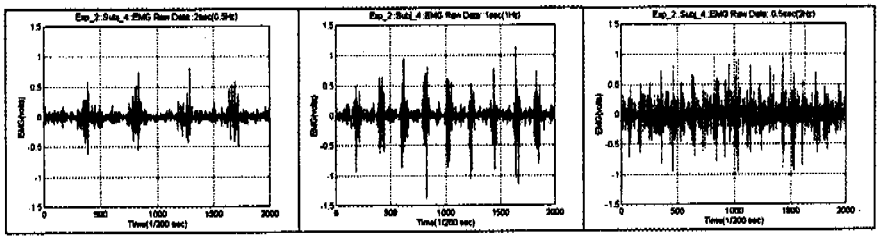
데이터 처리과정을 끝낸 EMG 데이터는 최종적으로 하나의 값으로 표현하기 위하여 RMS 값과 적분 값을 이용하였다. 이 결과를 피실험자 평균으로 나타낸 것이 그림10이다. 반복속도가 증가함에 따라 EMG 값이 증가하였다.

주관적 평가 데이터는 각도 데이터나 EMG 데이터와는 달리 데이터 처리과정을 필요로 하지 않는다. 그림11은 본 실험에서 측정된 피실험자의 주관적 평가 결과를 평균으로 산출하여 제시한 것이다. 주관적 평가 결과에서도 필터링된 각도 데이터 결과나 EMG 데이터 결과와 동일하게 반복속도가 증가함에 따라 그 값이 커졌음을 알 수 있다. 이는 실제로 피실험자가 반복속도가 증가함에 따라 더 큰 작업부하를 느끼고 있다는 것을 의미한다.

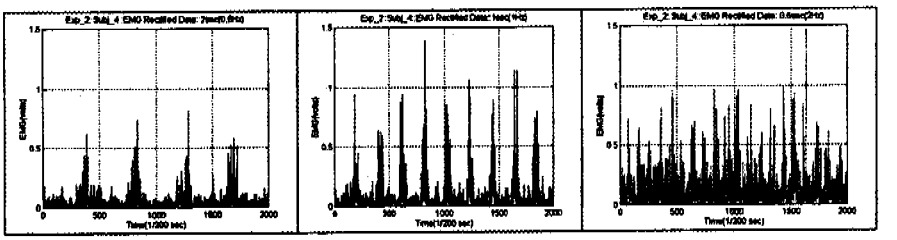
이상의 여러 결과들에 대한 유의성 검정 결과, 관절각도의 raw RMS값만이 반복속도에 유의하지 않았으며, 나머지 결과들은 모두 유의수준 0.05에 유의하였다.

그리고, 여러 결과들 사이의 반복속도에 따른 증가율 비교는 그림12에 나타나 있다. 관절각도의 raw 데이터를 제외한 기타 결과들은 각기 반복속도에 따라 일정한 증가율을 나타내고 있지만, 주관적 평가의 증가율은 다른 척도들의 증가율에 비해 크게 나타났다.

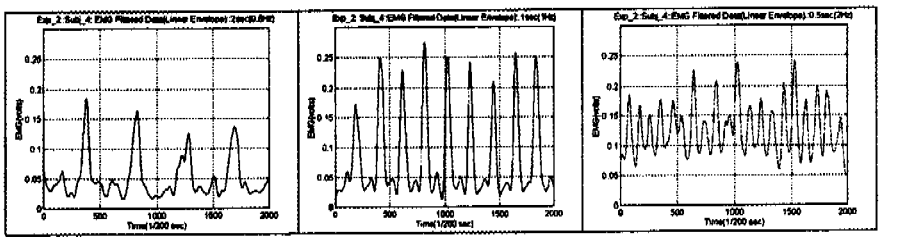
마지막으로 본 실험에 대한 결과간의 상관관계를 분석한 결과, 두 종류의 필터링된 데이터 결과



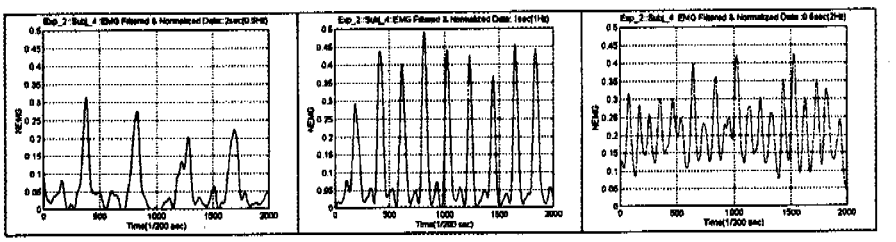
(a) Raw Data (0.5Hz, 1Hz, 2Hz)



(b) Rfectified Data (0.5Hz, 1Hz, 2Hz)



(c) Linear Envelope EMG (0.5Hz, 1Hz, 2Hz)



(d) Normalized EMG(0.5Hz, 1Hz, 2Hz)

그림9 손목운동 실험 EMG 처리과정 (예:피실험자4)

사이에 유의(p=0.0001)한 상관관계가 있었으며, 상관계수는 0.8867이었다. EMG 데이터의 경우 RMS값과 적분값 사이의 상관계수는 0.9874로 높게 나타났으며, p-value 역시 0.0001로 유의수준 0.01에 대하여 유의하게 나타났다. 주관적 평가의 결과에서는 관절각도 첫번째 필터링된 데이터 결과와 EMG RMS값, 그리고 EMG 적분 값에 대해 0.8013, 0.6610, 0.7336의 상관계수를 각각 나타내었으며, 이때 p-value는 0.0001, 0.0028, 0.0005로 유의수준 0.01에 대하여 모두 유의한 것으로 나타났다. 관절각도 두번째 필터링된 데이터 결과와 주관적 평가의 경우에는 다른 상관관계

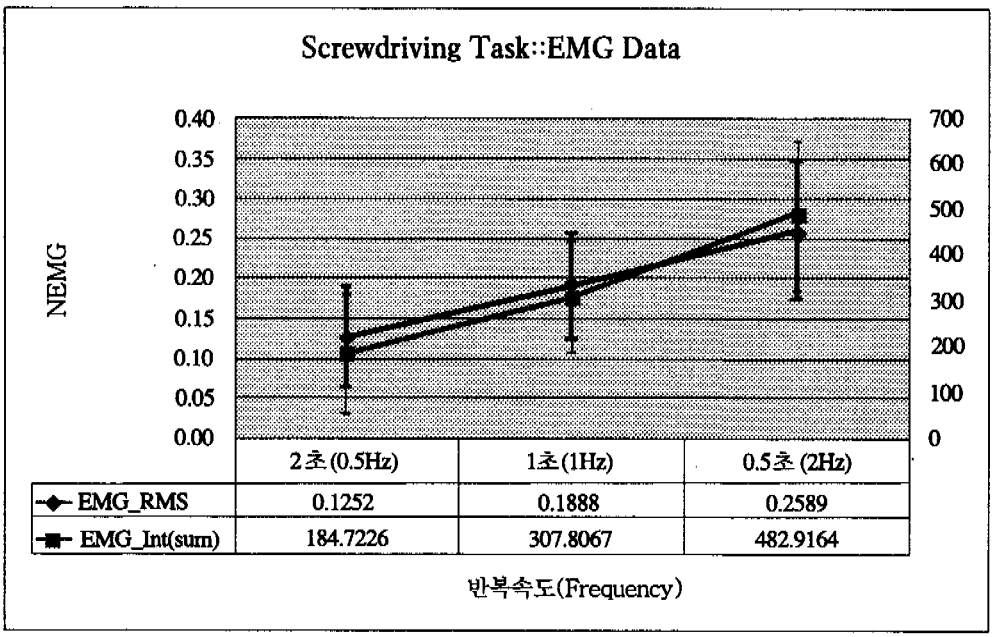


그림10 손목운동 실험 EMG 처리결과

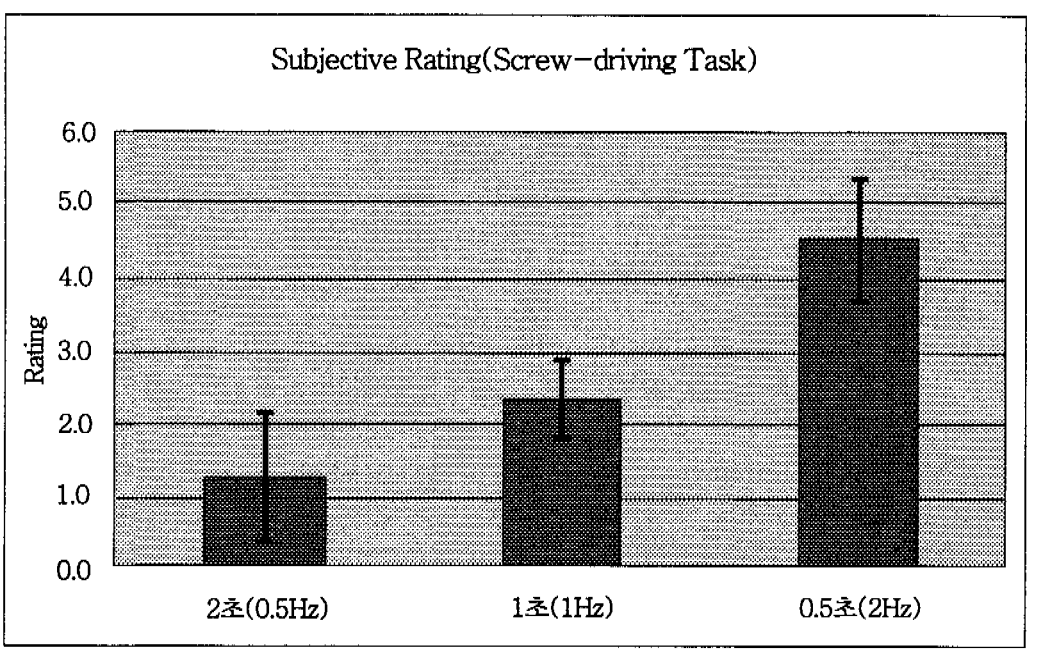


그림11 손목운동 실험 주관적평가 결과

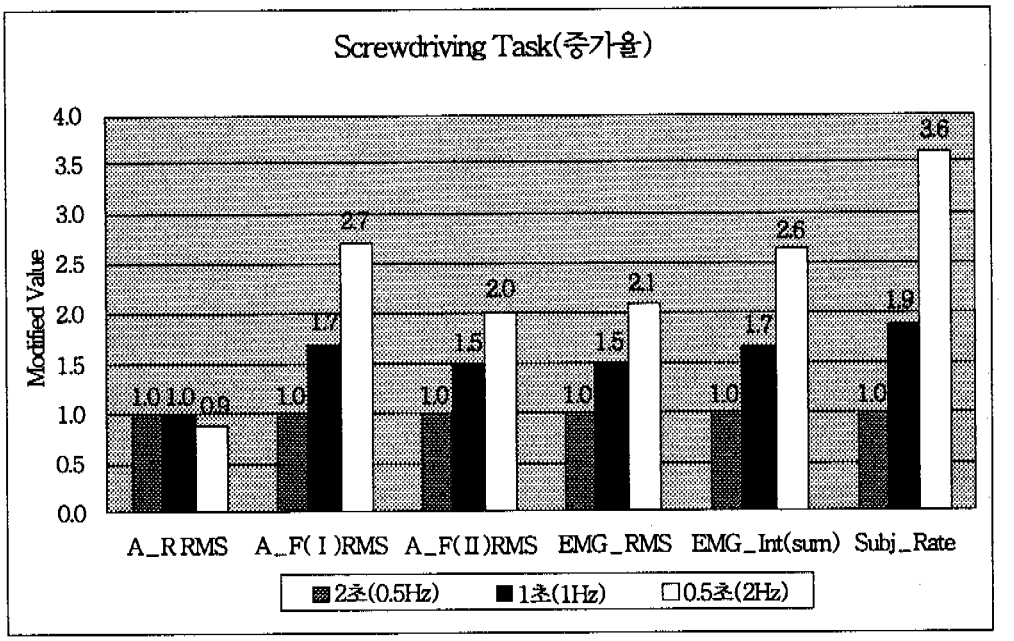
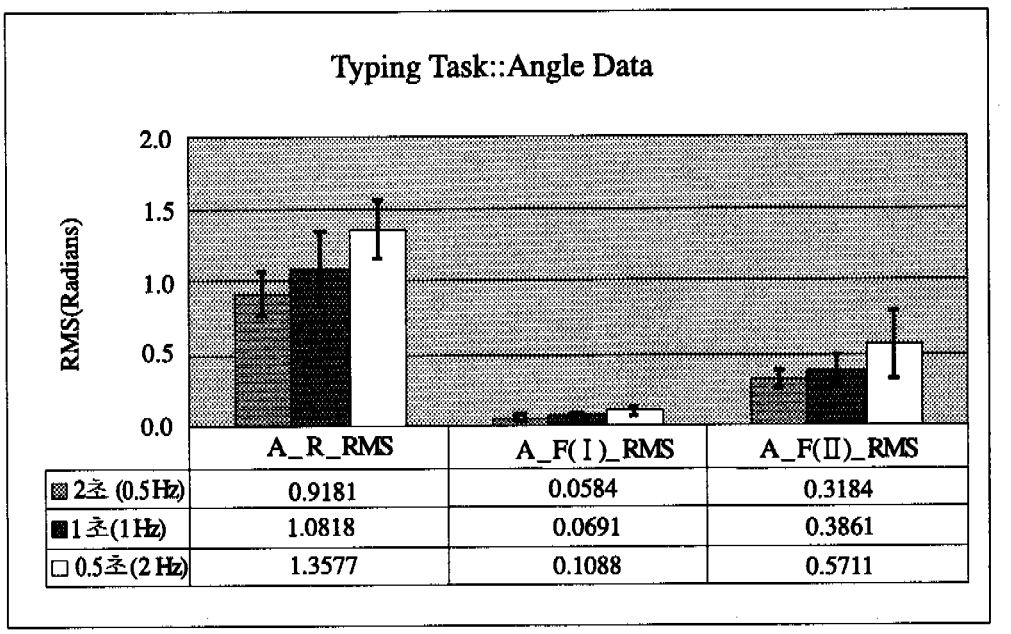


그림12 손목운동 실험 결과 중가율 비교



	A_R_RMS	A_F(Ⅰ)_RMS	A_F(Ⅱ)_RMS
2초 (0.5Hz)	0.9181	0.0584	0.3184
1초(1Hz)	1.0818	0.0691	0.3861
0.5초(2Hz)	1.3577	0.1088	0.5711

그림13 손가락운동 실험 각도 RMS 처리결과

와는 달리 비록 유의수준 0.01에서 유의하지는 않았지만, 0.5489 (p=0.0183)의 상관관계 계수를 산출하였다.

손가락운동 실험

본 절에서는 손가락운동 실험에서 측정된 데이터 처리결과를 서술하였다.

측정된 관절각도 데이터를 분석한 결과, 모든 관절에서 시간영역상의 데이터는 반복속도가 증가함에 따른 작업주기와 각변위의 차이를 보여주었으며, 주파수영역상의 데이터는 작업 빈도수에 해당하는 주파수에서 높은 진폭을 나타내고 있었다. 또한, RMS값에서 필터링된 데이터의 경향은 피실험자마다 차이가 없었지만, raw 데이터의 경우에는 다양한 경향을 나타냈다. 하지만, 그림13에서 나타났듯이 피실험자별 실험결과 평균은 결과적으로 raw 데이터 RMS값과 두 종류의 필터링된 데이터 RMS값이 반복속도에 따라 유사한 성향의 크기변화를 하였다.

본 실험을 통해 측정된 FDS(flexor digitorum superficialis) 근육의 EMG 데이터 처리결과는 반복속도가 빨라짐에 따라 EMG RMS값 및 적분값이 커졌으며, 주관적 평가 결과에서도 반복속도가 증가함에 따라 그 값이 커졌다.

여러 척도들에 대한 유의성 검정 결과는 6종류의 결과 모두 반복속도에 대해 유의수준 0.05에서 유의하다는 결과를 산출하였지만, 관절각도 raw 데이터의 RMS값에서는 쌍체비교 t-검정 결과 2초(0.5Hz)와 1초(1Hz)간의 수준간에는 유의한 차이가 없다는 결과를 도출하였다.

결과간의 반복속도에 따른 증가율을 비교한 결과, 주관적 평가 값이 손목운동 실험에서와 마찬가지로 다른 척도들의 결과값에 비하여 크게 나타났다.

본 실험의 결과들에 대한 상관관계를 분석한 결과, 관절각도 raw 데이터 결과와 두 종류의 필터링된 데이터 결과 상호간의 상관관계가 유의한 것으로 나타났다. 상관계수는 두 종류의 필터링된 데이터 결과사이가 0.8814(p=0.0001)였으며, raw 데이터 결과와는 0.6236(p=0.0099), 0.6348 (p=0.0082)이었다. EMG 데이터 결과인 RMS값과 적분값간의 관계도 유의(p=0.0001)하게 나타났으며, 상관계수는 0.9638이었다. 주관적 평가에 대해서는 관절각도 첫번째 필터링된 데이터 결과(p=0.0056)와 EMG RMS값(p=0.0067), 그리고 EMG 적분 값(p=0.0034)에 대해 유의하게 나타났으며, 상관계수는 각각 0.6584, 0.6475, 0.6846이었다. 관절각도 두번째 필터링된 데이터 결과와 주관적 평가의 경우는 비록 유의수준 0.01에서는 유의하지 않았지만, 0.5314(p=0.0342)의 상관관계 계수를 산출하여 비교적 상관관계가 높다는 것을 나타내었다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 손목 및 손가락운동 실험을 통하여 측정된 관절각도 데이터와 EMG 데이터 및 주관적 평가 데이터를 사용하여 반복적인 수작업을 평가하였다.

관절각도 데이터 처리에서는 먼저 시간영역(time domain)상에서의 raw 데이터가 반복속도에 따라 작업주기와 각변위에서 차이를 보였다. 피실험자에 따라 데이터 패턴의 차이를 보이기도 하였는데 특히, 손목운동 실험에 비해 많은 관절이 사용되는 손가락운동 실험의 경우에는 더 큰 차이를 보였다. 그 원인으로 키보드 타이핑 작업에서는 측정되는 모든 관절이 동시에 사용되지 않는다는 것과 Screw-driving작업과는 달리 피실험자마다 그리고 반복속도마다 수행되는 작업이 다르다는 것을 들 수 있다. 두번째로는 푸리에 변환(Fourier transform)에 의한 주파수영역

(frequency domain)상에서의 raw 데이터가 작업 빈도수에 해당하는 주파수에서 높은 진폭을 나타냈다. 이는 스펙트럼의 크기와 주파수는 관절 각변위의 진폭과 반복율에 근사적으로 일치한다(Radwin & Lin, 1993)는 연구결과를 지지하고 있다. 세번째로, 수행된 두 종류의 데이터 필터링 중에서 첫번째 필터링 결과는 고역통과 필터의 기능은 충분히 수행하였지만 RMS값의 크기가 현저히 작아지기 때문에 그 값에 대해서 분석작업에 의한 검증을 수행하기 전에는 직관적인 결론을 내리는 데에 문제가 있었다. 반면에, 버터워드 필터를 사용한 두번째 필터링은 고역통과 필터의 기능을 충분히 수행하였다.

이 필터의 설계를 위한 차분 방정식으로 비회귀 차분 방정식(non-recursive difference equation)을 사용하였으며, 차단 주파수(cutoff frequency)는 1Hz로 선정하였다. 이는 Lin & Radwin(1997)이 빈도수-가중치 필터를 설계할 때와 동일한 상황을 설정한 것이며, 전 장에서 언급한 바와 같이 표본화 주파수(sampling frequency)가 충분히 큰 경우에는 차단 주파수(cutoff frequency)의 선정에 문제가 없었다. 다시 말해서 반복속도가 증가함에 따라 높은 주파수에 해당하는 값들이 증가한다는 것을 의미하며 상대적으로 낮은 주파수에 해당하는 작업빈도수와 관련하여 높은 진폭(amplitude)을 가지는 값들은 필터링된 후에 많은 영향을 주지 못하였다. 마지막으로 데이터 처리 후 유의성을 검증해본 결과, 손목운동 실험의 raw 데이터를 제외하고는 모든 데이터들이 반복속도에 대해 유의하다는 결과를 산출하였지만, 손가락운동 실험의 raw 데이터의 경우도 2초(0.5Hz)와 1초(1Hz)의 반복속도 수준간에는 유의한 차이가 없다는 결과가 나왔다. Radwin et al. (1994)과 Lin & Radwin(1997, 1998)의 연구에서도 빈도수-가중치 필터의 검증실험을 통하여 raw데이터는 반복속도에 대해 유의하지 않았지만, 필터링된 데이터는 반복속도에 대해 유의하다는 결과를 도출하였다.

결론적으로 관절각도의 raw 데이터에 대한 RMS값으로는 반복성에 대한 작업부하를 평가하기에 적절하지 않았으며, 고역통과 필터를 이용한 두 종류의 필터링을 통하여 작업부하를 평가하기에 적합하도록 데이터 처리를 수행할 수 있었다. Marras & Schenmarklin(1993)에 따르면 위험률이 낮은 직업과 위험률이 높은 직업에 종사하는 작업자들 사이의 손목 각도(wrist flexion)를 측정하여 인간공학적으로 평가한 결과, 각속도와 각가속도 등 중요한 동적 척도(dynamic measure)에 유의한 차이가 있었으며, 이는 CTDs risk로 손목 각도(wrist flexion)의 각속도와 각가속도가 유의하다는 의미였다. 또한 Silverstein et al. (1986)은 많이(highly) 반복되는 작업은 적게(less) 반복되는 작업에 비해 부상을 일으킬 위험이 더 크며, 따라서 높은 반복빈도수(high frequency)의 동작이 일반적으로 더 위험하기 때문에 높은 반복빈도수 동작(high frequency motions)을 낮은 반복빈도수 동작(low frequency motions)에 비해 가중치를 두는 고역통과 필터를 이용한 필터링은 필수적이라고 하는 연구결과를 발표하였다. 이러한 연구 결과들은 본 연구의 추론과도 일치하고 있다.

본 연구에서의 EMG 데이터는 정규화된 linear envelope EMG를 이용하여 RMS값과 적분값으로 표현되었다. 데이터 처리 결과, 손목운동 실험의 Screw-driving 작업과 손가락운동 실험의 키보드 타이핑 작업 모두 반복속도가 증가함에 따라 RMS값 및 적분값이 유의하게 증가함을 보였다.

주관적 평가의 분석결과에서도 반복속도에 따라 그 값이 증가하였으며 이는 손목운동 실험과 손가락운동 실험의 공통된 결과였다. Freivalds & Eklund(1993)에 따르면 주관적 평가 방법도 작업자의 스트레스를 측정하는데 유용하다고 하였으며, 반복속도에 따라 주관적 평가 값이 커진다는 것은 작업이 힘들어진다는 것으로 해석된다.

필터링된 각도 데이터 결과와 EMG 결과 및 주관적 평가 결과를 종합해보면 반복속도가 증가함에 따라 피실험자가 느끼는 작업부하가 커진다는 것을 증명해주고 있다.

이상의 여러 결과들의 반복속도에 따른 증가율과 결과들간의 상관관계를 분석한 결과, 손목운동 실험과 손가락운동 실험에서 유사한 결과가 나왔다. 첫번째로 주관적 평가의 경우를 제외한 대부분의 결과들에서는 반복속도가 2배 · 4배 빨라짐에 따라 2배 · 4배 증가하지는 않았다. 이는 실제로 2배 빠른 작업을 수행한다 하여도 2배에 해당하는 부하를 발생시키지는 않지만, 2배 힘들다라고 느낀다는 것이다. 다시 말해, 사람들은 주관적 평가에서 객관적 평가 결과들보다 작업부하를 과다하게 평가하는 경향이 있었다. 두번째로 손목운동 실험의 관절각도 raw 데이터를 제외한 관절각도 데이터 사이에는 유의한 상관관계가 있었다. 특히, 손목운동 실험과 손가락운동 실험의 두 종류의 필터링된 각도 데이터 사이의 상관계수는 손목운동 실험과 손가락운동 실험이 각각 0.8867 ($p=0.0001$)과 0.8814($p=0.0001$)로 높게 나타났다. 또한, EMG RMS값과 적분값 사이에도 0.9874($p=0.0001$)와 0.9638($p=0.0001$)의 높은 상관계수를 가진 유의한 상관관계를 보였다. 마지막으로 주관적 평가에 대한 상관관계에 있어서는 손목운동 실험과 손가락운동 실험에서 동일하게 관절각도 첫번째 필터링된 데이터 결과와 EMG RMS값 그리고 EMG 적분 값에 대해 유의하게 나타났다. 관절각도 첫번째 필터링된 데이터 결과와의 상관계수는 손목운동 실험의 경우는 0.8013($p=0.0001$)이었으며, 손가락운동 실험의 경우 0.6584($p=0.0056$)였다. 이전 연구들에서 주관적 평가결과와 첫번째 필터링된 데이터 결과와의 상관계수가 Radwin et al. (1994)이 0.75($p=0.0011$), Lin & Radwin(1997)이 0.67($p=0.0025$), Lin & Radwin(1998)이 0.873($p=0.0063$)의 상관관계를 보인 것과 비교해 본다면, 본 연구에서는 사용된 척도간의 차이나 작업간의 차이에도 불구하고 높은 상관관계를 나타낸 것이다. 또한 손목운동 실험의 상관계수가 상대적으로 높은 것은 필터링된 값이 산업현장에서 행해지는 반복적인 작업과 유사한, 간단한 반복적인 손목 굴전/신전 작업에서 주관적 평가에 비례한다(Radwin et al., 1994)는 연구결과를 설명하고 있기도 하다. 주관적 평가와 EMG값들과의 상관계수를 보면 손목운동 실험의 경우는 RMS값과 적분값에 대해 각각 0.6610($p=0.0028$), 0.7336($p=0.0005$)이었으며, 손가락운동 실험의 경우에는 0.6475($p=0.0067$), 0.6846($p=0.0034$)이었다.

Johnson & Childress(1988)에 따르면 주관적 평가 결과가 EMG 결과와 일관되지만, 주관적 평가만의 결과는 효력이 없었다. 반면에 Kihlberg et al. (1993)는 주관적 평가와 EMG와의 관계는 매우 복잡하며, 주관적 평가는 EMG를 반발력(reaction force)의 척도(indicator)로 덜 유용하게 만든다고 하였다. 하지만, 본 연구의 결과로 미루어 주관적 평가는 EMG와 유의한 상관관계 및 일관성을 가지고 있으며, EMG와 작업부하를 평가함에 있어 유용한 척도(indicator)로 사용할 수 있을 것이라 판단된다. 주관적 평가와 관절각도 두번째 필터링된 결과의 경우에는 비록 유의수준 0.01에서 유의하지는 않았지만, 손목운동 실험과 손가락운동 실험에서 0.5489($p=0.0183$)와 0.5314($p=0.0342$)의 비교적 높은 상관관계 계수를 산출하였다.

본 연구에서는 현대 산업사회에서 행해지는 반복적인 손목 작업 뿐만 아니라 손가락 작업에서의 수작업 부하를 간단한 필터링을 수행한 관절각도의 변위를 이용하여 정량적으로 분석하였으며, 주관적 불편도라는 주관적인 척도와 EMG라는 객관적인 척도를 이용하여 검증하였다.

본 연구에서 수행되어진 여러 결과들을 이용하여 실제 산업 현장의 수작업 분석이나 기타 수작

업 연구에 응용하기 위해서는 다음과 같은 사항들이 추가로 연구되어야 할 것이라 생각된다.

첫째, 본 연구의 손가락운동 적용실험에서의 키보드 타이핑 작업의 경우 사용된 각 관절은 굴전/신전(Flexion/Extension)의 운동만을 한다고 가정하여 MCP관절의 내향/외향(Adduction/Abduction) 운동이나 손목관절의 편향(Deviation) 운동에 대해서는 고려하지 않았다. 하지만, 사람의 손가락이 3차원 운동을 하는 신체라는 점을 감안할 때 MCP관절의 내향/외향(Adduction/ Abduction) 각도나 손목관절의 편향(Deviation) 각도에 대한 고려도 수행되어야 할 것이다. 특히, 키보드 타이핑 작업의 경우에는 키보드의 형태 및 자판 배치상의 여러 가지 문제점으로 인하여 MCP관절의 외향(Abduction) 각도와 손목관절의 척골 편향(Ulnar Deviation) 각도가 심각한 문제점으로 대두되고 있는 실정이다.

둘째, 수작업의 종합적인 인체역학적 분석을 위해서는 반복성(repetitiveness)에 관한 분석 평가뿐만 아니라, 지속성(duration)과 힘(force)에 대한 평가도 병행되어야 할 것이다. 최근에 Klein & Fernandez(1997)는 pinching 작업에서 손목자세와 pinching force 그리고, 작업 지속성을 주관적 불편도와 EMG를 통해 분석 평가한 결과 지속성 및 pinching force에 대한 요인들이 손목자세와 마찬가지로 유의하다는 결론을 내렸다. 따라서, 여러 가지 다른 수작업에 있어 반복성(repetitiveness)만이 아니라 지속성(duration)과 힘(force)까지 고려한 작업부하(workload)의 평가는 종합적인 인체역학적(biomechanical)인 분석을 위해서 필수적으로 수행되어야 할 과제라 생각된다.

이상의 여러 가지 방법론들은 손목과 손가락 관절의 인체역학적 측정 분석에 적용될 수 있을 것이며, 궁극적으로는 인간공학적(ergonomic) 작업장 디자인과 반복적인 상지의 작업에 대한 평가 방법을 제시할 수 있는 지침(guideline)이 될 수 있을 것이다.

참고 문헌

(1) Basmajian, J.V. and De Luca, C.J., Muscles Alive, Fifth edition, Williams & Wilkins, Baltimore, 1985.

(2) Borg, G., "Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion", Scand. J. Work Environ. Health, 16(Suppl 1), 55-58, 1990.

(3) Borg, G., "Psychophysical bases of perceived exertion", Med. Sci. Sports and Exercise, 14, 377-381, 1982.

(4) Calvert, T.W. and Chapman, A.E., "Relationship between surface EMG and force transients in muscle: Simulation and experimental results", Proc. IEEE, 65, 682-689, 1977.

(5) Cannon, L.J., Bernacki, E.J. and Walter, S.D., "Personal and Occupational Factors Associated with Carpal Tunnel Syndrome", J. Occupational Medicine, 23(4), 255-258, 1981.

(6) Freivalds, A. and Eklund, J., "Reaction torques and operator stress while using powered nutrunners", Applied Ergonomics, 24(3), 158-164, 1993.

(7) Johnson, S.L. and Childress, L.J., "Powered screwdriver design and use: tool, task, and operator effects", International J. Ind. Ergonomics, 2, 183-191, 1988.

(8) Kihlberg, S., Kjellberg, A. and Lindbeck, L., "Pneumatic tool torque reaction: reaction forces, displacement, muscle

activity and discomfort in the hand-arm system", Applied Ergonomics, 24(3), 165-173, 1993.

[9] Klein, M.G. and Fernandez, J.E., "The effects of posture, duration, and force on pinching frequency", International J. Ind. Ergonomics, 20, 267-275, 1997.

[10] Lin, M.L. and Radwin, R.G., "Validation of a frequency-weighted filter continuous bio-mechanical stress in repetitive wrist flexion task against a load", Ergonomics, 41(4), 476-484, 1998.

[11] Lin, M.L. and Radwin, R.G., "A single metric for quantifying biomechanical stress in repetitive motions and exertions", Ergonomics, 40(5), 543-558, 1997.

[12] Marras, W.S. and Schoenmarklin, R.W., "Wrist motion in industry", Ergonomics, 36, 341-351, 1993.

[13] Mital, A., "Effect of body posture and common hand tools on peak torque exertion capabilities", Applied Ergonomics, 17(2), 87-96, 1986.

[14] Mital, A. and Kilbom, A., "Design, selection and use of hand tools to alleviate trauma of the upper extremities: Part II The scientific basis (knowledge base) for the guide", International J. Ind. Ergonomics, 10, 7-21, 1992.

[15] Putz-Anderson, V., Cumulative Trauma disorders : A Manual for Musculoskeletal Diseases of the Upper Limbs, Taylor & Francis, New York, 1988.

[16] Radwin, R.G., Lin, M.L. and Yen, T.Y., "Exposure assessment of biomechanical stress in repetitive manual work using frequency-weighted filters", Ergonomics, 37(12), 1984-1998, 1994.

[17] Radwin, R.G. and Lin, M.L., "An analytical method for characterizing repetitive motion and postural stress using spectral analysis", Ergonomics, 36(4), 379-389, 1993.

[18] Silverstein, B., Fine, L.J. and Armstrong, T.J., "Hand wrist cumulative trauma disorders in industry", Br. J. Ind. Med., 43, 779-784, 1986.

[19] Yun, M.H., A hand posture measurement system for the analysis of manual tool handling tasks, Unpublished Ph. D. Thesis, Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, Pennsylvania State University, 1994.

[20] Winter, D.A. and Yack, H.J., "EMG profiles during normal human walking : stride-to-stride and intersubject variability", EEG Clin. Neurophysiol., 67, 402-411, 1987.