

손목 동작의 반복과 외부 부하에 따른 심물리학적 부하

기 도 형

계명대학교 산업시스템공학과
(2004. 1. 16. 접수 / 2004. 9. 20. 채택)

Psychophysical Stress Depending on Repetition of Wrist Motion and External Load

Dohyung Kee

Department of Industrial and Systems Engineering, Keimyung University
(Received January 16, 2004 / Accepted September 20, 2004)

Abstract : This study investigated effect of arm posture, repetition of wrist motion and external load on perceived discomfort. The arm postures were controlled by shoulder flexion, elbow flexion, and wrist motions such as flexion, extension, radial deviation and ulnar deviation. An experiment was conducted to measure discomfort scores for experimental treatments using the magnitude estimation, in which the L16 orthogonal array was adopted for reducing the size of experiment. The results showed that while the effect of the shoulder flexion, repetition of wrist motion and external load was statistically significant at $\alpha = 0.05$ or 0.10 , that of the elbow and wrist motions was not. Discomfort ratings increased linearly as levels of wrist repetition and external load increased. This implies that the existing posture classification schemes such as OWAS, RULA, which do not properly consider effect of motion repetition and external load, may underestimate postural load. Based on the regression equation for wrist repetition and external load, isocomfort region indicating the region within which discomfort scores were expected to be the same was proposed. It is recommended that when assessing risk of postures or developing new posture classification schemes, motion repetition and external load as well as posture itself be fully taken into consideration for precisely evaluating postural stress.

Key Words : wrist motion, external load, psychophysical stress

1. 서 론

근골격계질환(musculoskeletal disorders)은 부적절한 작업 자세, 중량물 취급, 반복, 진동, 정적 자세, 극한 온도 등의 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 발병한다¹⁾. 근골격계질환은 한번 발병하면 장기간의 요양을 요하여 기업, 작업자 모두 큰 피해를 초래하므로, 이의 예방이 무엇보다 중요하다. 근골격계질환의 예방을 위해서는 앞서 언급한 여러 위험요인들의 존재 여부와 존재한다면 위험의 크기를 평가할 수 있어야 한다. 근골격계질환에 관련된 위험요인의 평가는 주로 자세 부하의 평가에 치중되어 왔다. 자세 부하 평가 방법으로 OWAS²⁾, RULA³⁾, REBA⁴⁾ 등이 산업 현장에서 많이 사용되고 있다.

우리나라 근골격계질환 요양자를 대상으로 한 설문조사에서 근골격계질환의 원인으로 동작의 반복 41.2%, 과도한 동작 40.6%, 불안정한 작업 자세 14.2% 등의 순서로 들어, 작업자들은 동작의 반복을 근골격계질환의 가장 큰 원인으로 생각하고 있는 것으로 나타났다⁵⁾. Silverstein과 Armstrong⁶⁾은 574명의 작업자들을 관찰한 결과 동작의 반복이 CTD(cumulative trauma disorders)의 발병에 유의한 영향을 미치고, 큰 힘을 발휘하는 동작을 반복할 때는 CTD 발병율이 더욱 커짐을 밝혔다. 또한, 동작의 반복은 다른 위험요인과 독립적으로 근골격계질환의 발병에 심각한 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있으나, 반복요인에 대한 연구는 많지 않다. Lin et al.⁷⁾, Lin과 Radwin⁸⁾, Yen과 Radwin⁹⁾은 손목 굴곡 동작의 반복과 힘 발휘(exertion)에 따른 심물리학적 부하를 측정할 실험을 바탕으로, 이들 부하를 나타낼 수 있

는 frequency-weighted filter 모형의 개발에 관한 연구를 수행하였다. Carey와 Gallwey¹⁰⁾는 손목 자세, 힘 발휘, pace(동작 반복)를 실험 변수로 하고 VAS(visual analog scale)로 주관적 불편 수준을 측정하는 실험을 수행하여, 힘 발휘 요인이 불편 수준에 가장 큰 영향을 미치고 pace의 영향이 가장 작음을 보였다. Dahalan과 Fernandez¹¹⁾, Kim과 Fernandez¹²⁾, Marley와 Fernandez¹³⁾는 손목 굴곡 자세와 발휘 근력에 따른 gripping task, drilling task에 대한 최대허용빈도(maximum acceptable frequency)를 조정 방법(method of adjustment)을 이용하여 결정하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 동작 반복에 관한 대부분의 연구는 손목 동작, 특히 굴곡 동작에 집중되어 있으며, 손목 이외의 팔 동작을 결정하는 어깨, 팔꿈치 동작은 고려되지 않고 있다. 그러나, 산업 현장에서는 손목에서도 굴곡 이외의 신전, 요골편향, 측골편향 동작이 자주 일어나며, 어깨, 팔꿈치 자세가 팔 자세의 주관적 불편 수준에 영향을 미친다. 이는 자세부하를 측정하기 위하여 많이 사용되고 있는 RULA, REBA 등의 어깨, 팔꿈치 동작의 분류 체계에서도 알 수 있다. 또한, Lin et al.⁷⁾의 연구에서는 손목 굴곡의 반복 수준이 분당 4회, 20회, Carey와 Gallwey¹⁰⁾의 연구에서는 10회와 20회로 일부 수준에만 제한되어 있어, 조금 더 포괄적인 반복 수준에 대한 연구가 요망되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 어깨, 팔꿈치, 손목 등의 동작으로 조절되는 팔 자세, 좀 더 일반적 반복 수준과 외부 부하(external load)에 따른 주관적 불편도를 측정하여, 이들이 심물리학적 부하에 미치는 영향을 정량적으로 제시하고자 한다.

2. 방법

2.1. 피실험자

본 연구의 주관적 불편 수준을 측정하는 실험에는 과거 근골격계질환의 병력이 없는 건강한 남자 대학생 13명이 참여하였다. 피실험자들의 연령, 신장, 체중의 평균과 표준편차는 다음과 같다: 1) 연령: 25.4 ± 1.6 ; 2) 신장: 174.3 ± 5.6 ; 1) 체중: 65.8 ± 5.7 . 피실험자들에게는 실험 참여시간에 대한 수당을 지불하였다.

2.2. 실험계획

목적에서 언급한 바와 같이 실험 변수로는 어깨,

팔꿈치, 손목으로 결정되는 팔 자세, 손목 동작의 반복 수준, 외부 부하 등으로 하였으며, 이들 변수 조합에 대한 지각 불편 수준을 심물리학적 방법으로 측정하였다. 실험 변수의 내용과 수준은 다음 Table 1에 나와 있다.

어깨와 팔꿈치 동작은 LUBA¹⁴⁾의 분류 체계에서 중간 수준을 넘지 않도록 하며, 눈으로 구분하기 쉬운 각도를 선택하였으며, 손목 동작은 각 자유도 동작의 ROM(range of motion)의 50% 정도의 수준이 되도록 하였다. 손목 동작의 반복 정도는 Lin et al.⁷⁾, Lin과 Radwin⁸⁾, Yen과 Radwin⁹⁾, Carey와 Gallwey¹⁰⁾의 연구를 참조하여 결정하였으며, 외부 부하는 수직방향으로 손이 낼 수 있는 최대 힘¹⁵⁾의 약 10% 이내가 되도록 하였다. Table 1의 실험 변수와 수준은 예비 실험을 통하여 부자연스러운 자세, 피실험자가 수행하기 어려운 자세 등을 제외한 후 결정된 것이다.

Table 1의 실험 변수와 수준에 대하여 완전요인 계획법(full factorial design)으로 실험 계획을 하면, 피실험자당 512회의 실험을 수행하게 되어 실험 크기(size)가 커져 현실적으로 수행하기 어렵게 된다. 따라서, 본 연구에서는 품질관리에서 자주 사용되고 있는 직교배열표를 이용하여 실험 크기를 줄였다. 즉, L16 직교 배열표에 Table 1의 실험 변수의 주효과(main effect)를 15개 열에 배열하였다. 자세, 동작 반복과 외부 부하 혹은 발휘 힘의 크기간의 교호작용(interaction effect)은 유의하게 나타나지 않은 기존 연구 결과들^{7,8,10)}을 따라 실험 요인으로 고려하지 않고 주효과만 배열하였다.

실험 처치에 따른 주관적 불편 수준은 심물리학적 방법인 magnitude estimation의 free modulus 방법으로 측정하였다. magnitude estimation 방법을 이용하면 주관적 불편도를 interval 혹은 ratio scale의 값으로 측정할 수 있어, 다양한 정량적 통계 기법을 적용할 수 있는 이점이 있다.

Table 1. Experimental variables and their levels

변수	수준	
팔 자세	어깨 동작	굴곡 0°, 60°
	팔꿈치 동작	굴곡 30°, 60°, 90°, 120°
	손목 동작	굴곡 30°, 신전 30°, 요골편향 15°, 측골편향 25°
손목 동작의 반복	10, 15, 20, 30회/분	
외부 부하	0, 1, 3, 4kg	

2.3. 실험 절차

실험에 앞서 실험의 목적, 내용, 실험 중 일어날 수 있는 상해의 위험에 대하여 충분히 설명하고, 실험 참여에 대한 동의를 구하였다. 실험 참여에 자발적으로 지원한 피실험자들에 대하여 magnitude estimation을 수행할 능력이 있는 지를 평가하는 calibration test를 실시하였다. calibration test는 임의의 길이로 되어 있는 10개의 선(line)을 제시하고, 선의 크기에 대한 주관적 느낌을 숫자로 답하게 하여, 자극과 응답의 log 변환 값에 대한 선형 회귀식을 구한 후 기울기의 99% 신뢰 수준 내에 1.0이 있는 가로 검정하였다¹⁶⁾. calibration test에는 16명이 참여하여 13명이 통과하였다.

calibration test를 통과한 피실험자를 대상으로 실험 처치에 따른 불편 수준을 측정하는 본실험(main experiment)을 수행하였다. 피실험자는 실험자의 도움을 받아 실험 처치에 따른 자세와 외부 부하를 취하고, 컴퓨터의 buzz 소리에 맞추어 실험을 시작한다. 반복은 손목의 중립 자세에서 Table 1에 주어진 각 자유도 동작의 수준까지 왕복하는 것으로 정의되며, visual basic으로 된 컴퓨터 소프트웨어로 조절되는 buzz 소리가 나면 1회씩 같은 동작을 반복한다. 반복 간에는 실험 처치의 자세, 즉 손의 위치에 알맞게 조절된 높낮이 조절 가능한 탁자 위에 외부 부하를 올려놓게 하여, 외부 부하를 쥐고 있는 시간으로 인한 효과를 제거하였다. 각 실험은 5분간 수행되었으며 각 실험 처치는 피실험자마다 random하게 다른 순서로 제시하였다. 실험은 하루에 8회씩 이틀에 걸쳐 실시하였다.

마지막으로 심물리학적 실험에서 자주 사용되는 9개의 verbal category에 대한 주관적 느낌의 크기를 측정하였다. 9개의 verbal category는 극히 불편, 매우 불편, 불편, 약간 불편, 보통, 약간 편함, 편함, 매우 편함, 극히 편함 등이 포함되었다. 이는 본실험에서 각 실험 처치에 대하여 숫자로만 측정된 불편 정도를, 우리가 일상 생활에서 사용하는 보통의 말(plain word)로 나타내어 의미를 쉽게 알 수 있게 하기 위함이다. verbal category 평가 시에는 본실험에서 사용한 것과 같은 scale을 사용하도록 하였다.

3. 결과

실험에서 불편 수준의 측정에 magnitude estimation의 free modulus 방법을 이용하였기 때문에, 각

피실험자마다 사용한 scale이 다를 수 있다. 따라서, 분석에 앞서 이들 scale들을 통일하는 변환이 필요하며, 본 연구에서는 다음과 같은 max-min 변환 방법을 이용하였다. 변환은 각 피실험자별로 수행되었으며 변환 후 각 실험 처치마다 13명의 피실험자들의 평균을 구하여, 이들 값을 추후 분석에 사용하였다.

정규화된 불편도 =

$$\frac{\text{raw data} - \text{최소 불편도}}{\text{최대 불편도} - \text{최소 불편도}} \times 100$$

여기서, 최대, 최소 불편도는 각 피실험자별 불편 수준의 최대, 최소값을 나타냄.

3.1. 분산분석

실험 변수들이 불편 수준에 미치는 영향의 유의성을 알아보기 위하여 분산분석을 실시하였으며, 그 결과는 다음 Table 2에 나와 있다. 어깨 동작과 반복 수준은 유의수준 10%에서 주관적 불편도에 유의한 영향을 미치며, 외부 부하는 유의수준 5%에서 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면, 손목과 팔꿈치 동작은 유의하지 않음을 보였다. Table 2에서 보는 바와 같이 외부 부하의 영향이 다른 변수의 영향에 비하여 매우 크게 나타났으며, 다음으로 어깨 동작, 반복 수준 등의 순서로 유의성의 정도가 줄어들었다.

Table 2. ANOVA results

변수	자유도	Mean square	F value	P value
어깨 동작	1	541.609	18.45	0.050*
팔꿈치 동작	3	117.222	3.99	0.206
손목 동작	3	147.571	5.03	0.170
손목의 반복	3	334.848	11.41	0.081*
외부 부하	3	2639.715	89.93	0.011**
Error	2	29.353		

*: significant at $\alpha = 0.10$, **: significant at $\alpha = 0.05$.

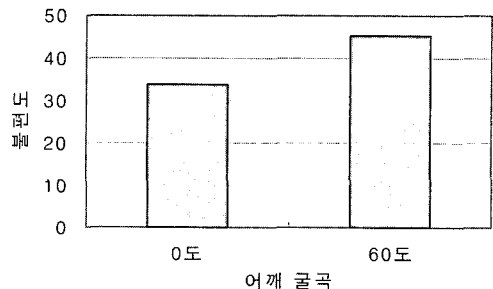


Fig. 1. Discomfort depending on shoulder flexion

3.2. 어깨 동작

어깨 관절에서는 굴곡 2수준에 대하여 불편도를 측정하였으며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 중립 자세(굴곡 0°)보다 굴곡 자세(굴곡 60°)에서 불편도가 크게 나타났다. 이러한 차이는 RULA, REBA의 분류 체계와 일치한다.

3.3. 손목 동작의 반복

손목 동작-굴곡, 신전, 요골편향, 측골편향의 반복에 따른 불편 수준의 경향은 Fig. 2에 나와 있으며, 동작의 반복 수준이 증가함에 따라 불편도가 거의 선형적으로 증가함을 보이고 있다. 선형 회귀분석에서 결정계수(R²) 값이 1.0에 가까워 이러한 경향을 뒷받침하고 있다.

3.4. 외부 부하

외부 부하가 증가함에 따라 불편 수준도 선형적 증가 경향을 보였으며(Fig. 3), 손목 동작의 반복 요인에 비하여 기울기가 매우 커 외부 부하에 따른 불편도의 증가 경향과 함께 영향이 큼을 보여 주고 있다. 즉, 외부 부하가 1.0kg 증가하면 지각 불편도는 14.0 정도 증가함을 보이고 있다.

3.5. verbal category

9개의 verbal category에 대한 평가 결과는 Fig. 4

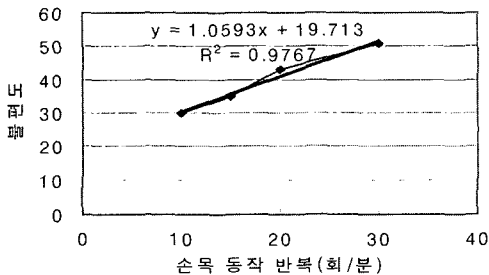


Fig. 2. Discomfort depending on wrist repetition

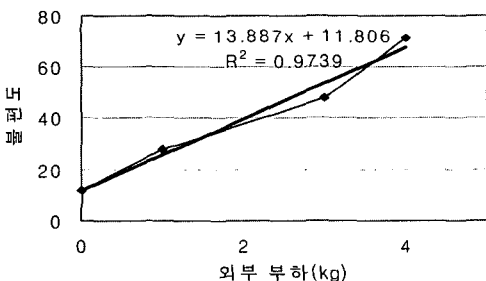


Fig. 3. Discomfort depending on external load

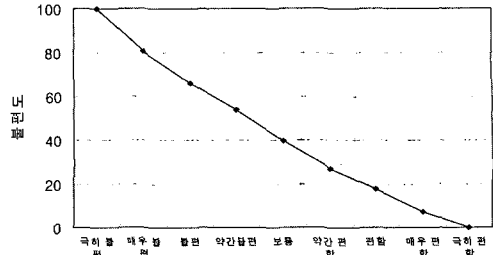


Fig. 4. Discomfort according to verbal category

에 나와 있으며, 극히 불편에서 극히 편함으로 갈수록 선형적으로 혹은 포물선 형태로 불편 정도가 줄어들음을 보이고 있다.

3.6. 손목 동작 반복과 외부 부하

손목 동작의 반복과 외부 부하에 따른 불편도를 알아보기 위하여 이들을 독립변수로 하는 회귀분석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다. R²값이 0.82를 보여 불편 수준이 손목 동작의 반복과 외부 부하에 대한 선형관계로 잘 fitting됨을 알 수 있다.

$$\text{불편도} = -5.93 + 0.94 * \text{반복(회/분)} + 13.88 * \text{외부 부하(kg)}$$

위의 회귀식을 이용하여 손목 동작의 반복과 외부 부하에 따른 등편의 영역(isocomfort region)을 생성하여 제시하였다(Fig. 5). 등편의 영역은 영역의 경계 내에 있으면 불편 혹은 편의 수준이 같은 영역으로 정의된다. 그림에서 보는 바와 같이 verbal category가 보통 혹은 약간 편함일 때는 실험에서 사용한 손목 동작 반복과 외부 부하의 수준 범위 내의 모든 조합에 대하여 등편의 영역이 정의되나, 매우 불편 혹은 극히 편함 쪽으로 갈수록 등편의 영역이 정의되는 손목 동작의 반복과 외부 부하의 조합의 수가 줄어들고 있다. 극히 불편에 대한 등편의 영역은 정의되지 않아 그림에 나타나 있지 않다.

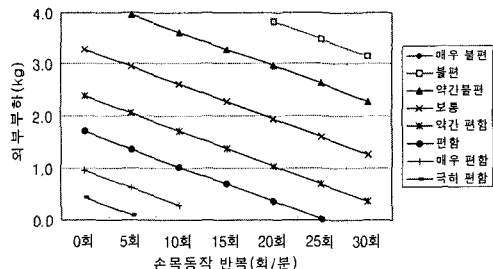


Fig. 5. Isocomfort region depending on wrist motion and external load

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 어깨, 팔꿈치, 손목 자세, 손목 동작의 반복과 외부 부하 등에 대한 불편 수준을 측정하는 실험을 수행하여, 이들이 지각 불편도에 미치는 영향을 살펴보았다. 분산분석에서 어깨 자세, 손목 동작의 반복과 외부 부하는 유의수준 5% 혹은 10%에서 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 팔꿈치와 손목 자세는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 외부 부하의 영향이 다른 실험 요인들에 비하여 영향의 정도가 매우 큼을 보였으며, 손목 동작의 반복과 외부 부하의 수준이 증가함에 따라 불편 수준이 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

OWAS에서는 10kg이하, 10-20kg, 20kg 이상 등의 3구간, RULA에서 2kg이하, 2-20kg, 20kg이상 등의 중량과 동작이 연속적 혹은 단속적인가에 따른 4구간, REBA에서는 5kg이하, 5-10kg, 10kg이상 등의 3구간으로 나누어 외부 부하 혹은 힘 발휘의 영향을 반영하고 있다. 그러나, 본 연구에서는 팔 자세의 경우 외부 부하가 1kg 단위로 달라져도 주관적 불편도가 크게 차이가 남을 보이고 있어, 기존의 자세 부하 체계들은 외부 부하의 영향을 과소평가하고 있다고 할 수 있다. 또한, 동작 반복의 영향이 OWAS에서는 반영되어 있지 않으며, RULA, REBA에서는 동작에 관련된 관절 혹은 지체의 구분없이 분당 4회 동작 반복을 기준으로, 동작 반복의 영향을 고려할 것인가를 결정하고 있다. 본 연구에서 나타난 손목 동작의 반복의 영향의 정도를 고려할 때, 동작의 반복도 기존 자세 부하 체계들이 제대로 반영하고 있다고 하기 어렵다. 따라서, 근골격계질환의 예방을 위한 준비 단계로 부하의 크기를 올바르게 평가하기 위한 새로운 자세 부하 평가 방법의 개발이 요구된다 하겠다.

본 연구에서 손목 자세가 지각 불편도에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 것은 Lin et al.^{7), Lin과 Radwin⁸⁾, Carey와 Gallwey¹⁰⁾의 연구 결과와 일치하지 않는다. Lin et al.^{7), Lin과 Radwin⁸⁾의 연구에서는 손목의 굴곡 동작만을, Carey와 Gallwey¹⁰⁾의 연구에서는 굴곡, 신전, 요골편향 및 측골편향 동작을 다루었으나, 이들 연구에서는 각 자유도 동작에 대한 수준들간에 유의한 차이가 있음을 보였다. 그러나, 본 연구에서는 굴곡, 신전, 요골편향 및 측골편향 등의 자유도 동작을 실험 변수가 아닌 손목 동작의 수준으로 하여, 자유도 동작간의 지각 불편 정}}

도에 유의한 차이가 없음을 보였다. 따라서, 본 연구의 결과는 기존 연구에서처럼 자유도 동작 내에서 수준간에 불편도가 유의하게 다름을 보인 것이 아니라, 손목에서 일어나는 4자유도 동작간에 유의한 차이가 없음을 보인 것이므로 결과 해석 시 주의가 요구된다.

본 연구에서는 팔 자세, 손목 동작의 반복과 외부 부하를 실험 변수로 하여 불편도를 측정하였을 뿐만 아니라, 9개의 verbal category에 대한 불편 정도를 측정·제시하여 실험에서 의미없는 단순한 숫자로 측정된 불편 수준을 일상생활의 용어로 쉽게 해석할 수 있게 하였다. 또한, verbal category에 대한 손목 동작의 반복과 외부 부하에 따른 등편의 영역을 제시하여, 2 요인간의 상대적 부하의 크기를 비교할 수 있게 하였다. 즉, 손목 동작의 반복과 외부 부하가 포함되어 있는 작업의 부하 평가 시나, 평가 결과 부하가 클 경우 2 요인 중 어느 요인을 어느 정도 줄이면 적절한 것인가 등을 결정하는 등의 경우에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 분산분석에서 어깨 자세, 손목 동작의 반복과 외부 부하 등의 3 변수가 유의한 것으로 나타났으나, 자세 요인에 대해서는 기존 연구들에서 많이 다루어졌고 어깨 자세는 2 수준에서만 불편도를 측정하였기 때문에, 본 연구에서는 이를 제외하고 손목 동작의 반복과 외부 부하의 조합에 대한 등편의 영역을 제시하였다.

참고문헌

- 1) W.S. Marras, "Occupational low back disorders causation and control", *Ergonomics*, Vol. 43, No. 7, pp. 880~902, 2000.
- 2) O. Karhu, I. Kuorinka, "Correcting working postures in industry: a practical method for analysis", *Applied Ergonomics*, Vol. 8, No. 4, pp. 199~201, 1977.
- 3) L. McAtamney, E.N. Corlett, "RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders", *Applied Ergonomics*, Vol. 24, No. 2, pp. 91~99, 1993.
- 4) S. Hignett, L. McAtamney, "Rapid entire body assessment(REBA)", *Applied Ergonomics*, Vol. 31, pp. 201~205, 2000.
- 5) 한국산업안전공단, 산업재해원인조사, 2003.
- 6) B.A. Silverstein, L.J. Fine, T.J. Armstrong, "Hand wrist cumulative trauma disorders in industry",

- British Journal of Industrial Medicine, Vol. 43, pp. 779~784, 1986.
- 7) M.L. Lin, R.G. Radwin, S.H. Snook, "A single metric for quantifying biomechanical stress in repetitive motions and exertions", Ergonomics, Vol. 40, No. 5, pp. 543~558, 1997.
 - 8) M.L. Lin, R.G. Radwin, "Agreement between a frequency-weighted filter for continuous biomechanical measurements of repetitive wrist flexion against a load and published psychophysical data", Ergonomics, Vol. 41, No. 4, pp. 459~475, 1998.
 - 9) T.Y. Yen, R.G. Radwin, "Comparison between using spectral analysis of electrogoniometer data and observational analysis to quantify repetitive motion and ergonomic changes in cyclical industrial work", Ergonomics, Vol. 43, No. 1, pp. 106~132, 2000.
 - 10) E.J. Carey, T.J. Gallwey, "Effects of wrist posture, pace and exertion on discomfort", International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 29, pp. 85~94, 2002.
 - 11) J.B. Dahalan, J.E. Fernandez, "Psychophysical frequency for a gripping task", International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 12, pp. 219~230, 1993.
 - 12) C-H. Kim, J.E. Fernandez, "Psychophysical frequency for a drilling task", International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 12, pp. 209~218, 1993.
 - 13) R.J. Marley, J.E. Fernandez, "Psychophysical frequency and sustained exertion varying wrist postures for a drilling task", Ergonomics, Vol. 38, No. 2, pp. 303~325, 1995.
 - 14) D. Kee, W. Karwowski, "LUBA: an assessment technique for postural loading on the upper body based on joint motion discomfort and maximum holding time", Applied Ergonomics, Vol. 32, pp. 357~366, 2001.
 - 15) H.P. Van Cott, R.G. Kinkade, "Human Engineering guide to equipment design", Joint Army-Navy-Air Force Steering Committee, 1972.
 - 16) G.A. Gescheider, Psychophysics: method, theory, and application, Lawrence Erlbaum Associates, London, 1985.