Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 25, No. 1 pp.7-16, February 2006

작업시간과 단위작업부하에 따른 연속작업의 심물리학적 자세부하 평가*

박재규[1] · 박성준[2] · 정의승[1]

[1]고려대학교 산업시스템정보공학과 / [2]남서울대학교 산업경영공학과

Psychophysical Evaluation of Postural Stresses for Combined Task at Varying Working Time and Workload of Single Tasks

Jaekyu Park[1], Sungjoon Park[2], Eui S. Jung[1]

[1]Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University, Seoul, 136-701
[2]Department of Industrial and Management Engineering, Namseoul University, Cheonan, 330-707

ABSTRACT

The objective of this study is to identify the effects of postural stresses for a combined task at varying working time and workload of single tasks. Ten male subjects participated in this study of appraising perceived discomfort of varying times, action levels and exposure ratio with each three levels. It has not been possible up until now to fully evaluate combined tasks since previous studies limited themselves only to the evaluation of static postures. This study is to analyze quantitatively about the effect of perceived discomfort at varying working time, action levels, and exposure rate. The ANOVA results showed that the perceived discomfort of a combined task was significantly affected by each of the independent variable such as working time, action levels, and exposure rate. It was also apparent that the interactions between action levels and exposure, working time and exposure rate were significant(p<0.001). The result implies that a new workload assessment for combined tasks is in need to reflect the duration of work and workload of single tasks. In order to support the statement, a regression model of perceived discomfort obtained from the experiment was developed and compared to that of discomfort obtained from the validation test. Results showed that the perceived discomfort on combined tasks was proportional logarithmically to the working time. It is expected that the result help to properly estimate the workload on a combined task and can be used as a valuable design guideline on preventing work-related musculoskeletal diseases in industry.

Keyword: Combined task, Postural assessment, Single tasks, Discomfort, Working time

1. 서 론

신체 부위의 불편은 통증(pain, soreness), 저림/무감각(numbness), 경직(stiffness) 등을 유발하는 관절각도(joint angle), 근육의 수축, 압력 분포 등의 생체역학적(biomechanical) 요인과 관련되어 있다(Zhang et al., 1996). 이러한 불편은 추후 나타날 수 있는 통증, 이로 인한 상해 등의

*이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-000-11831).
교신저자: 박성준
주 소: 305-701 충남 천안시 성환읍 매주리 21번지, 전화: 041-580-2204, E-mail: sjpark@nsu.ac.kr

전조(precursor)로 볼 수 있으며, 또한 작업에 관련된 부하를 올바르게 평가할 수 있는 것으로도 알려져 있다(Corlett and Bishop, 1976). 그리고 물리적 제약(physical constraint)을 제거하여 불편을 최소화하면 근골격계질환의 위험을 줄일 수 있는 것으로 보고되고 있다(Dul et al., 1994; Putz-Anderson and Galinsky, 1993). 작업부하 혹은 근골격계질환 관련 요인의 위험 수준을 객관적으로, 그리고 정량적으로 측정할 수 있는 방안이 없는 경우와 위에서 언급한 불편 수준과 근골격계질환과의 관계를 고려할 때, 주관적 불편 수준을 측정하는 심물리학적(psychophysical) 방법이 유용하다고 할 수 있다(기도형, 2004).

근골격계질환의 원인은 부적절한 자세, 인력물자 취급, 작업 강도, 정적부하, 반복작업 등으로 알려져 있으며(Kilbom, 1994), 지속적인 불안정한 자세를 취할 경우 그 빈도가 증가하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 여러 요인들 중 힘, 부적절한 자세 등의 요인이 작업부하 혹은 근골격계질환에 미치는 영향의 크기와 정량화에 대한 연구가 주를 이루어 왔다. 작업자세와 관련한 작업부하를 정량적으로 평가하기 위한 기초적 도구/방법(preliminary tool)으로 OWAS(Karhu et al., 1977), RULA(McAtamney and Corlett, 1993), REBA(Hignett and McAtamney, 2000)와 같은 자세부하 평가 체계(posture classification scheme)들이 일반적으로 사용되고 있는데, 이들 방법들은 자세부하(postural stress)의 평가에 주안점이 맞추어져 있어 가한 힘, 반복, 지속 시간(duration) 등은 상대적으로 반영 정도가 미약하다고 할 수 있다. OWAS, RULA, REBA 등의 방법에는 외부부하의 크기가, RULA와 REBA에는 지속 시간이 반영되어 있으나 그 구간이 커 실제 작업장에서 일어나는 부하의 크기를 제대로 평가하지 못하고 있다. 또한 이러한 근골격계질환에 대한 기존의 연구들은(Boussenna et al., 1982; Lin & Radwin, 1997; Lin & Radwin, 1998; 기도형, 2004)은 대부분 정적인 작업에서 대한 평가가 이루어져 왔으며 손목을 포함한 팔을 사용하는 자세에 국한되어 있어 연속적인 작업 및 복합작업에 대한 분석은 아직 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 연속적인 작업 및 복합작업에 있어 작업부하, 시간, 노출비율이 지각 불편도에 미치는 영향의 크기를 실험을 통하여 정량적으로 파악함으로써 단위작업들로 인한 전체작업의 작업부하를 평가하고자 한다.

2. 문헌 연구

2.1 다중작업 및 연속작업 분석

기존의 작업부하와 관련된 다중작업 및 연속작업에 대한 연구는 다음의 크게 세 가지로 구분된다.

- 신체에 미치는 역학적인 부하를 통한 인체역학적 분석
- 중량 및 빈도 분석을 통한 인력물자취급작업(MMH)
- 작업자세 분석을 통한 작업자세 평가기법

신체에 걸리는 부하를 인체역학적 계산을 통해 추정하는 분석은 정확한 측정이 가능하다는 장점에 비해 연속작업과 같이 다양한 변화에 대해 데이터를 수집하는데 어려움이 있다. 그리고 인력물자취급작업에 대한 접근 방법은 혼합 들기지수(Composite Lifting Index, CLI)(Walters, 1994), 최대허용중량(MAWOL)(Snook and Ciriello, 1991)을 통해 다중작업에 대한 분석을 실시하고 있으나 이러한 방법들은 들기작업에 국한되어 다양한 작업에 대한 분석에 이용하기에는 한계가 있다. MMH 작업 연구에 있어서도 하나의 작업동작을 대상으로 한 연구가 주종을 이루었으나 다양한 작업동작이 결합되어 이루어지는 작업에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다(윤훈용, 1999).

또한, 근골격계질환 부하평가를 위한 작업자세 평가기법의 경우에 있어서는 관찰적 평가기법을 바탕으로 다양하게 시도되어 오고 있다. OWAS가 단위작업에 대한 분석을 통한 전체작업에 대한 부하를 평가를 할 뿐 RULA, REBA 등의 작업자세 평가기법은 단위작업 내의 유해한 자세에 대해서만 작업부하를 평가하고 있다. OWAS의 경우 단위작업의 평가에 있어 각 신체 부위별 자세에 대해 카테고리화하여 분석하고 있으나 전체작업에 대한 평가에 있어서는 단위작업 중 최고값만을 가지고 평가하기 때문에 연속작업에 대한 작업부하 평가에 한계가 있다. 최근 작업자세 평가기법에 대한 연구는 많이 이루어지고 있지만 이러한 평가기법들은 전체작업 중 유해 작업의 정적인 자세에 대한 평가를 목적으로 하기 때문에 작업자가 수행하는 다양한 작업들을 분석하기에는 어려움이 있다. 특히 과거의 조립산업의 단순반복작업들이 점차 기술의 발전과 함께 복잡해지고 다양해짐으로써 한 사람의 작업자가 취급하는 작업들은 날이 갈수록 늘어가고 있다. 이와 더불어 제조기술의 발달과 자동화 제조업에서의 높은 임금 때문에 교대작업이 빈번하게 이루어지면서 작업시간은 생산성뿐만 아니라 작업자의 안전에 큰 영향을 미치는 요인이 되고 있다(Niebel & Freivald, 2003). 이러한 측면에서 복합작업 및 연속작업에 대한 작업자의 부하 측정 및 유해 작업분석의 중요성은 증대된다고 볼 수 있다.

2.2 작업시간

연속작업에 대한 불편도의 변화를 보기 위해서는 연속된 작업에 따른 시간의 변화를 보는 것은 필요하다. 예를 들어 REBA 점수가 극단적으로 짧은 작업시간에 이루어질 경우

에 이를 유해 작업이라 단정하기에는 한계가 있다. 기존의 작업자세 평가기법들은 대부분 정적인 작업 대상으로 이루어졌기 때문에 시간에 대한 접근 보다는 작업빈도에 대한 접근만이 이루어져 왔다. 그러나 작업자세 평가기법 및 불편도와 관련된 연구(Manenica, 1986; Taksic, 1986; Dul et al., 1994; 기도형, 2004; 나석희 등, 2004)에서 자세지속시간에 따른 영향이 있음을 보여줌으로써 시간의 고려가 필요함을 알 수 있었다. 특히 기도형(2004) 연구에 의하면 지속 시간에 의한 불편도의 변화는 40초 이후에 자세변수에 큰 영향을 미친다고 보고하고 있다. 이에 따라 연속된 작업에서 시간을 고려한 불편도의 측정이 요구된다.

2.3 유해 노출비율(Hazard exposure rate)

연속작업과 같은 복합작업에 대한 기존의 접근은 일정한 시간에 대한 작업부하의 평균 혹은 전체작업 중 최대부하의 정도를 통해 연구가 이루어져 왔다. 이러한 연구들은 전체작업의 부하를 측정하는 간단한 방법이지만 실제적인 단위작업의 부하를 반영하기에는 한계가 있다. 특히 복합작업을 이루는 하나의 작업요소에 대한 평가일 뿐 단위작업으로 구성된 전체작업의 부하에 대한 평가로 보기에는 한계가 있다. Brown and Li(2003)는 RULA Score와 QEC의 노출비율의 비교를 통해 노출비율에 의한 조치단계를 알아보았다. 노출비율은 전체작업에서 유해한 작업들에 대한 비율을 의미하는 것으로서 일련의 여러 작업으로 수행되는 연속작업의 유해 정도를 파악하는데 용이하다고 할 수 있다.

표 1은 QEC의 노출비율에 따른 조치수준을 RULA의 Acton level에 비교한 것이다.

표 1. QEC Action level(Brown and Li, 2003)

QEC score (Percentage Total)	Action	Equivalent RULA score
< 40%	Acceptable	1~2
40~49%	Investigate further	3~4
50~69%	Investigate further and change soon	5~6
≥ 70%	Investigate and change immediately	≥ 7

3. 연구방법

3.1 피실험자

불편도와 관련된 시간 및 노출비율에 따른 피실험자의 지각 불편도를 측정하기 위하여 10명의 근골격계질환 병력이 없는 20~30대 남자를 대상으로 실험을 실시하였다. 피실험자의 평균 연령, 신장, 체중은 각각 25.7(±2.6)세, 177.2(±2.3)cm, 72.5(±5.8)kg이다. 피실험자는 근골격계질환 및 본 연구와 관련된 실험의 목적, 내용, 위험성 등에 대해 설명을 들었으며, 실험 참여 전에 서면으로 동의하였다.

3.2 실험장비

본 연구에서는 다양한 작업부하수준에서 실험을 수행할 수 있도록 실험용 장비를 제작하였다. 본 연구에서는 자동차 조립공정의 자세를 대상으로 실험에 적용할 작업을 구성하였으며 실제 자동차의 후면부 제원에 근거하여 앵글과 합판을 이용하여 제작하였다. 높이는 최하단부부터 60cm, 30cm, 40cm로 최상단까지 130cm이었으며 허리 굽힘 동작을 수행할 수 있도록 2단에서 최상단의 앵글 사이에는 150°의 경사가 되도록 하였다. 그림 1은 본 실험에서 제작된 장비를 보여주고 있다.

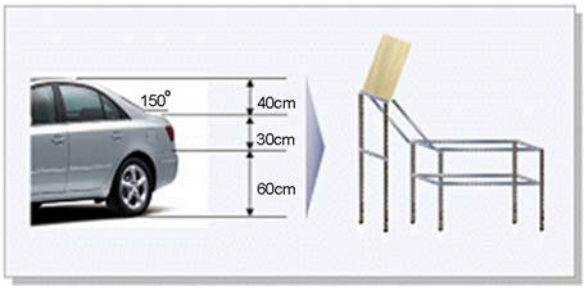

그림 1. 연구 내용 및 추진도

또한 대상작업을 수행하는데 있어 피실험자들이 주어진 수준에서 실험을 수행하는지에 대한 여부를 검증하고자 사전 연구에서 제작된 자세측정시스템을 이용하였다(박성준 등, 2005). 자세측정시스템의 사용을 위해서는 피실험자의 관절 위치를 검출하기 위한 랜드마크와 자세측정을 위한 디지털 캠코더가 요구된다. 촬영된 영상은 자세측정시스템을 이용하기 위해 Microsoft사의 Windows Movie Maker를 이용하였다.

3.3 실험계획

실험에 이용된 독립변수는 3수준의 작업부하수준과 3수준의 작업시간 그리고, 3수준의 노출비율로 하여 27개 조합수준의 3×3×3 within-subject design으로 반복측정하였다. 작업부하수준은 불편도 함수에 영향을 미치는 자세 및 외부

부하에 대한 고려를 위해 REBA의 점수를 기준으로 정의하여 실험을 수행한다. 주관적 불편도 및 복합작업에 대한 연구(이인석 등, 2003; Cho et al., 2005)에 의하면 작업부하에 대한 주관적 불편도는 REBA 점수와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서 수준이 너무 세분화되면 피실험자의 판단에 어려움이 있기 때문에 부하수준은 REBA 점수를 기준으로 2~4수준의 3단계로 하였다.

작업시간은 기도형(2004) 연구를 바탕으로 최초 측정 시점을 40초로 하였다. 또한 연속작업측정을 위한 간격은 그 다음 시점인 1분 30초로 하였다. 이는 연속작업이 빈번한 자동차 공장 조립라인의 1661개 단위작업을 대상으로 한 작업 사이클 타임 분석에 기초한 것으로서(고려대학교 환경의학연구소, 2004), 50초 간격의 3수준(40초, 1분 30초, 2분 20초)으로 실험을 구성하였다.

본 연구에서의 노출비율의 정의는 REBA의 Action level 수준을 바탕으로 QEC에서의 노출비율산정 방식의 개념을 적용하고자 하였다. 예를 들어 노출비율 70%이라는 것은 연속작업이 일련의 두 가지의 단위요소, E1, E2로 이루어졌다고 하였을 때, E1의 REBA 점수가 $REBA_{e1}$, E2의 REBA 점수가 $REBA_{e2}$라면, 해당 작업의 노출비율은 {($REBA_{e1}$+$REBA_{e2}$)/단위요소 수(2)}/MAX($REBA_{e1}$, $REBA_{e2}$)의 비율이 70%가 됨을 의미한다(식 1 참고). 기존의 연구(Brown and Li, 2003)에서 RULA의 Action level과 QEC의 노출비율의 비교를 통해 조치수준을 정하였던 방식을 따라 REBA의 조치수준에 대한 각 수준을 구분하고자 하였다.

$$\text{노출비율} = \left[\frac{\sum_{j=1}^{e} \text{REBA}_j}{e} \right] / (Max(REBA_1, REBA_2, ..., REBA_j)) \times 100 \quad \text{(식 1)}$$

여기서, REBAj는 j번째 단위요소의 REBA Action level (j=1, 2, 3, ... , e)
e는 단위요소 수

종속변수는 각 실험 조건에 대한 지각 불편도를 사용하였으며 심물리학적(psychophysical) 방법 중 magnitude estimation을 이용하였다. 본 연구에서는 피실험자 자신의 scale로 자극의 크기를 평가하는 free modulus method를 채택하여, 피실험자는 주어진 부하에 대한 불편도를 숫자로 답하게 하였다. 이 방법은 실험자가 피실험자에게 미치는 영향이 적으며 피실험자의 비율척도 능력을 최대한 발휘하게 하는 장점이 있다(이인석 등, 2002).

Free modulus 방법을 사용하여 측정할 경우, 같은 자세라도 피실험자에 따라 다양한 불편도 데이터가 얻어진다. 본 연구에서는 max−min transformation을 사용하여 각 데이터를 표준화 하였다(Hwang and Yoon, 1981).

$$\text{정규화 불편도} = \frac{\text{Rawdata} - \text{최소불편도}}{\text{최대불편도} - \text{최소불편도}} \times 100 \quad \text{(식2)}$$

본 연구에서의 실험변수와 각 수준을 정리하면 아래의 표 2와 같다.

표 2. 실험변수와 수준

실험 변수	수 준
작업시간	40초, 1분 30초, 2분 20초
작업부하의 정도	Acton level 2, Acton level 3, Acton level 4
노출비율	40%, 60%, 80%

표 2에서 보는 바와 같이 각 요인의 수준 수는 3 level로서 full−factorial design으로 실험을 계획하여 피실험자 1인당 27회의 실험수가 요구되었다.

3.4 실험 대상작업

본 실험에서 이용된 작업은 자동차 조립공정에서 나타나는 작업을 대상으로 빈번하게 발생하는 20개의 작업을 선정한 후, 각 작업부하수준으로 그룹핑을 하여 최종 각 조치수준에 따라 2가지씩의 작업으로 구성된 총 10개의 작업을 제시하였다. 제시된 작업은 실제 작업 현장의 작업을 기준으로 구성함을 원칙으로 하였으며, 실험 중 피실험자의 재현가능성, 분석의 용이성 등을 고려하여 현실성을 벗어나지 않는 범위 내에서 단순화하고자 하였다. 그림 2는 본 실험에서 이용된 작업자세에 대해 3DSSPP를 이용하여 형상화한 것이다.

3.5 실험 절차

실험에 앞서 피실험자에게 먼저 실험의 목적, 내용, 실험방법 및 실험 과정에서 발생 가능한 위험 요인 등에 대하여 설명을 하였다. 실험에 동의한 피실험자는 실험 참여 동의서를 작성하고 신체 특성에 대한 설문을 조사한 후, 실험 참여에 문제가 있는 피실험자는 실험 대상에서 제외시키도록 하였다. Magnitude estimation을 수행할 능력이 되는 지를 알아보는 피실험자 검증 평가를 실시한 후 통과한 피실험자를 대상으로 실시되었다. 피실험자 검증 평가에 있어서 직선의 길이를 숫자로 평가하는 방법인 numeric estimation 방법으로 피실험자들의 결과를 log변환한 후 선형회귀분석을 실시하여, 기울기의 신뢰 구간이 1.0을 포함하는 지를 검정

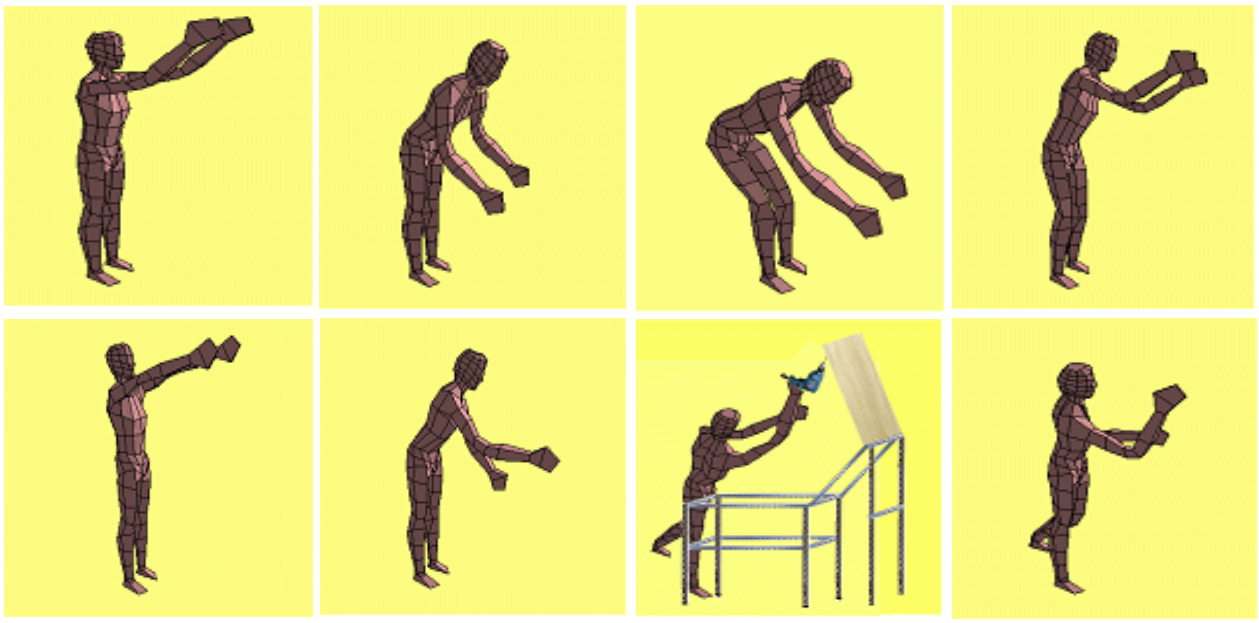

그림 2. 대상작업의 예

하여 피실험자의 비율척도 능력을 판단하였다(Gescheider, 1985). 본 연구에서는 13명의 피실험자가 참여하여 10명이 피실험자 검증 평가를 통과하고 본 실험에 참여할 수 있었다.

본 연구에서 연속된 작업에 대한 평가를 하기 위해서는 각 조건에 따른 작업자세의 변화에 있어 즉각적인 반응이 요하기 때문에 실험에 이용되는 자세를 숙지하도록 연습과정을 두었다. 연습과정에서는 주어진 자세에 대한 그림을 제시하고 이에 따라 자세를 연습하게 하였으며, 외부부하가 있는 경우에는 작업장의 작업 공구를 잡는 방향과 같은 형식으로 하도록 교육하였다.

피실험자에게 주어진 27회의 실험 순서는 무작위(random)로 제시되었으며, 각 실험 간에 약 5분간의 휴식 시간을 주었다. 또한, 피실험자가 실험 도중 상해의 위험이 있거나, 피로의 누적으로 인한 불편도의 영향이 다음 실험으로 미친다고 판단될 경우 실험을 중단할 수 있음을 주지시켰다. 각 실험에서는 자세를 취한 후 다음 자세를 취하는 시간에 대해서는 배제하였으며 최대한 신속하게 자세를 바꾸도록 교육하였다. 또한 실험 중에는 주어진 부하수준에 대한 검증을 위해 자세 측정 시스템을 통해 촬영을 실시하였다.

4. 결 과

4.1 분산분석

본 연구에서 설정한 독립변수인 시간, 작업부하수준, 노출비율이 불편도에 미치는 영향을 알아보았으며, 시간과 작업부하수준, 시간과 노출비율, 작업부하수준과 노출비율 사이의 교호작용에 있어서의 유의성을 살펴보았다. 지각 불편도에 대한 분산분석 결과, 시간, 작업부하수준, 노출비율에 있어서는 유의수준 1%에서 유의한 것으로 나타났다(각기 p=0.0014, p=0.0001, p=0.0001). 시간과 작업부하수준, 시간과 노출비율, 작업부하수준과 노출비율의 2인자 교호작용에 있어서는 시간과 노출비율, 작업부하수준과 노출비율에 대해 유의한 것으로 나타났다(각기 p=0.0001, p=0.0001). 표 3은 지각 불편도에 대한 분산분석 결과를 보여주고 있다.

표 3. 불편도에 대한 분산분석

Source	DF	SS	MS	F-Value	Pr>F
시간	2	6569.119	3284.559	9.64	0.0014*
작업부하수준	2	91076.114	45538.068	134.25	<.0001*
노출비율	2	36968.403	18484.201	190.92	<.0001*
시간× 작업부하수준	4	575.030	143.757	1.07	0.3839
시간× 노출비율	4	1738.009	434.502	11.98	<.0001*
작업부하수준× 노출비율	4	6043.177	1510.794	18.86	<.0001*
시간× 작업부하수준× 노출비율	8	775.838	96.980	2.88	0.0078*

*: significant at α=0.01

분산분석을 통해 독립변수로 고려한 시간, 작업부하수준 그리고 노출비율이 모두 불편도에 유의한 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 이는 연속작업 평가에 있어 이 세 가지 요인이 고려되어야 될 요인이라는 것을 보여주고 있다고 할 수 있다. 분산분석에서 유의한 차이를 보인 시간 및 작업부하수준, 노출비율에 대해 Fisher's LSD 사후분석을 실시하였다(그림 3, 4, 5 참고). 시간 수준 간 지각 불편도의 평균을 비교한 결과, 40초와 140초, 90초와 140초 간에 지각 불편도의 차이가 유의한 것으로 나타났다(각각 p=0.004, p=0.0231). 작업부하수준의 수준 간 지각 불편도의 평균을 비교한 결과, 모든 부하수준 간에 지각 불편도의 차이가 유의한 것으로 나타났다(각각 p=0.0001, p=0.0001, p=0.0001). 또한 노출비율의 수준 역시 모든 수준 간에 지각 불편도의차이가 있는 것으로 분석되었다(각기 p=0.0001, p=0.0001, p=0.0001).

그래프에서 보는 바와 같이 작업부하수준의 경우 시간과

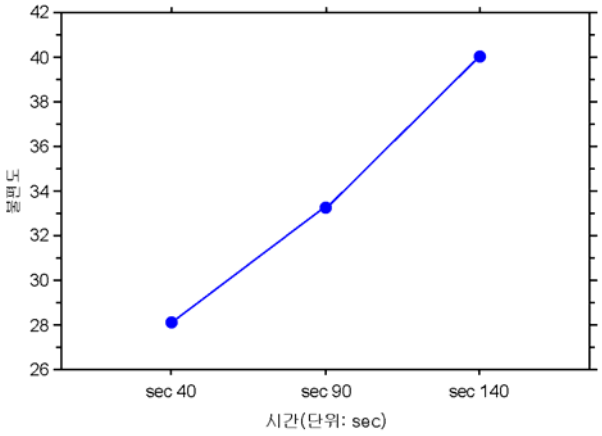

그림 3. 시간에 따른 불편도

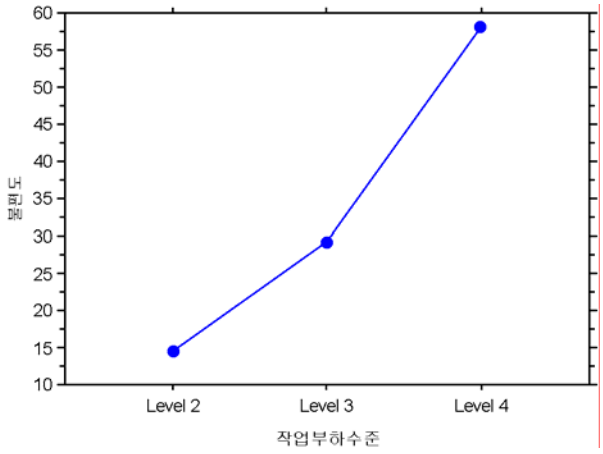

그림 4. 작업부하수준에 따른 불편도

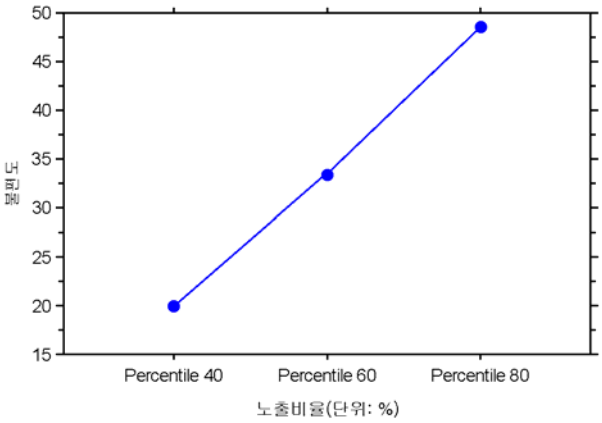

그림 5. 노출비율에 따른 불편도

노출비율에 의한 변화에 비해 그 수준이 증가할수록 증가하는 기울기가 급함으로써 작업부하수준에 의한 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다.

4.2 교호작용

분산분석 결과, 시간과 노출비율, 작업부하수준과 노출비율의 2인자 교호작용 발생함을 알 수 있었다. 즉, 노출비율에 따른 불편도의 변화가 시간 및 작업부하의 수준에 따라 통계적으로 유의한 교호작용이 발생하는 것이라 말할 수 있다. 아래의 그림 6~8은 2인자 교호작용에 대한 interaction plot을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시간과 노출비율의 교호작용에 있어 노출비율이 증가할수록 시간 40~140초 사이에 주관적 불편도가 증가하는 것으로 나타났으며, 작업부하수준 역시 그 값이 증가할수록 노출비율 40~80% 사이에 주관적 불편도가 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 작업시간은 노출비율과 함께 불편도를 증가시키는 요인이 됨을 알 수 있고 노출비율은 작업부하수준과 함께 불편도의 값을 증가시킴을 알 수 있다.

4.3 불편도와 다양한 작업부하수준과의 비교

기존의 작업자세 평가기법에 관한 연구(Karhu et al., 1977; Cho et al., 2005)들에 있어 복합작업부하평가는 단위작업 중 가장 유해한 작업의 작업부하에 초점이 맞추어져 왔다. 그러나 분산분석 결과에서 보았듯이 시간과 노출비율 역시 고려될 사항임을 알 수 있었다. 특히 불편도와 자세지속 시간에 관한 연구를 통해 불편도에 시간이 영향을 미치고 있다고 알려져 있고, 연속작업과 같은 반복작업에 관한 연구(Radwin et al., 1994; Lin and Radwin, 1998)에서 전체작업의 부하 평가를 위해 구성된 단위작업의 평균적인 접근만

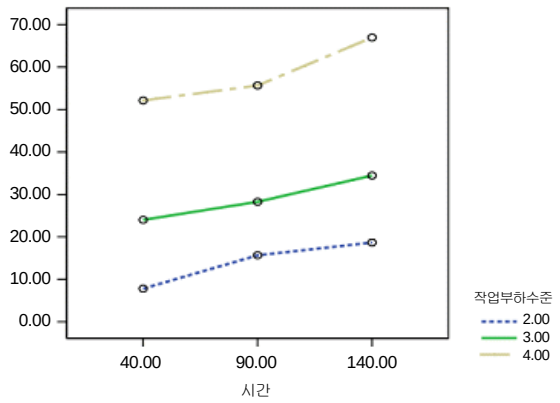

그림 6. 시간과 작업부하수준의 교호작용

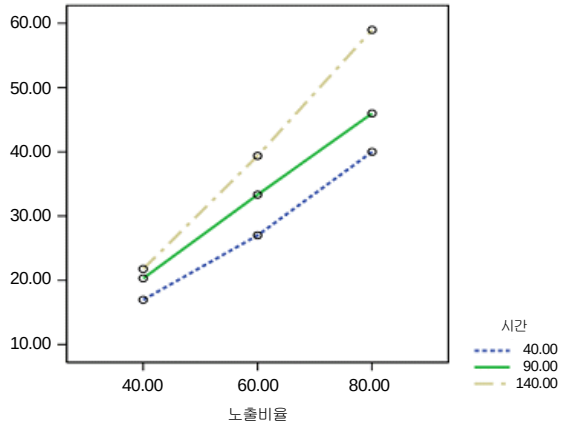

그림 7. 노출비율과 시간의 교호작용

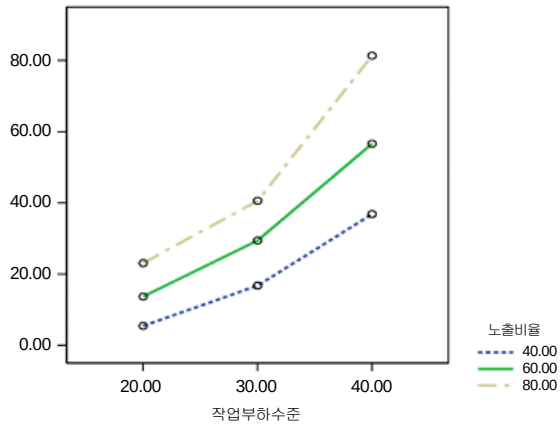

그림 8. 작업부하수준과 노출비율의 교호작용

을 해왔다. 이에 본 연구 결과를 바탕으로 불편도와 최대작업부하수준, 단위작업부하의 단순평균, Log 시간 가중 단위작업부하와의 상관관계를 알아보았다. 단위작업부하의 단순평균은 ∑단위작업부하/단위작업 수이며, Log 시간 가중 복합작업부하는 ∑(Log(단위작업시간)×단위작업부하))/Log(전체 작업시간)이다.

표 4. 불편도의 상관분석

		불편도	최대 작업부하 수준	단위작업 부하의 단순평균	Log 시간 가중 복합 작업부하
불편도	Pearson 상관계수	1	0.689**	0.821**	0.842**
	유의확률 (양쪽)		0.000	0.000	0.000
	N	270	270	270	270

**: significant at α=0.01

표 4에서 보는 바와 같이 연속작업에서의 불편도는 최대작업부하수준보다는 단위작업부하의 단순평균을 적용한 경우 더 높은 상관관계를 보였다. 이는 기존의 작업부하의 최대값만 적용하기 보다는 전체작업을 구성하는 단위작업에 대한 고려가 이루어져야 함을 알 수 있다. 특히 단위작업부하의 단순평균만을 적용하기보다는 시간의 로그함수를 치환해 줌으로써 주관적 불편도를 잘 설명해주고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 시간의 변수가 불편도가 증가함에 따라 로그함수의 형태로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4.4 불편도 모델 도출

표준화된 지각 불편도와 각각의 연속작업에 영향을 미치는 요인간의 관계를 모형화하고자 분산분석에서 유의한 차이가 발생한 변수 및 각각의 2인자 교호작용, 최대작업부하, 본 실험에서 제시한 독립변수와 상관관계에서 높은 상관관계를 보인 시간가중 단위작업부하 및 단위작업부하의 단순평균, 시간의 Log 함수 그리고 Log 시간가중 복합작업부하에 대해 중회귀분석을 실시하였다. 작업부하수준은 앞서 언급한 기존의 연구 결과를 바탕으로 전체작업 중 최대 부하를 고려한 것이며, 시간의 Log 함수와 시간가중 단위작업부하 및 단순평균은 본 연구에서 제시된 고려할 변수 이외의 연속작업에서 고려되어야 할 요인에 대해 알아보기 위함이다. 중회귀 분석과정에서 모형의 적합도 및 변수 선정을 위해 Mallow's C_p값과 R^2값을 기준으로 주요 변수를 선정하였다. 작업부하수준, Log 시간가중 복합작업부하, 시간×노출비율이 변수로 선정이 되었으며 회귀식 도출과정에서 다중공선성(Multicollinearity) 문제를 야기할 수 있는 단위작업부하 단순평균 변수는 제외하였다. 회귀분석을 통해 도출한 식은 아래의 식 3과 같다.

불편도 = −39.15083+9.18985(작업부하수준)+
6.91344(Log 시간가중 복합작업부하)+
0.11213(시간×노출비율)
(식 3)

회귀분석에 대한 분산분석 결과, 모델은 유의수준 1%에서 유의하였으며 추정된 모델의 R^2는 0.7414로 나타났다.

4.5 타당성 검증

회귀분석을 통해 얻어진 회귀식이 연속작업 불편도와의 설명력을 알아보기 위해 추가 실험을 수행하였다. 추가 실험에서는 실험계획적인 밸런싱을 맞추기 보다는 발생 가능성이 있는 경우에 대한 고려를 하고자 하였다. 앞서 상관관계 분석을 통해 단위작업부하의 단순평균은 다른 변수들에 비해 상관관계가 매우 높게 나타났으나 이는 실험계획에서 단위 작업시간과 노출비율에 있어 밸런싱을 맞춰 나타났을 가능성이 있다. Cho et al.(2005)의 연구에서 언급한 작업부하가 최대인 단위작업이 극단적으로 매우 짧은 시간에 이루어진 경우 전체작업의 유해성을 최대 작업부하의 정도로 판정하기에는 어려움이 있다. 이에 동일한 전체작업시간이 주어진 경우, 주어진 3수준의 노출비율 하에 작업부하의 수준을 각각 가장 높은 수준, 중간 수준, 가장 낮은 수준이 나타나도록 한 후 각 노출비율 당 세 가지 수준의 극단적으로 매우 긴 시간을 줌으로써 그 변화를 살펴보았다. 추가 실험에서는 총 5명의 20대 남자가 실험에 참여하였으며 이들 역시 앞선 실험과 마찬가지로 근골격계질환 병력이 없는 이들을 대상으로 하였다. 피실험자에 주어진 각 실험 조건에 의한 작업들은 사전에 경험한 적이 없는 작업을 대상으로 이루어졌다. 피실험자들의 주관적 불편도 평균과 실험 조건에 따른 회귀식의 값들 간의 Paired T−test를 수행한 결과, 회귀식에 있어서 유의수준 5%에서 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다(p=0.232). 아래의 표 5는 불편도와 회귀식에 의한 추정값과의 Paired T−test 결과를 보여주고 있다.

표 5. 불편도와 각각의 회귀식에 의한 추정값과의 Paired T−test

	대응차			t	자유도	유의확률(양쪽)
	평균	표준편차	평균의 표준오차			
불편도−모델 추정값	−3.11327	7.22530	2.40843	−1.293	8	.232

**: significant at α=0.05

위의 표 5에서 보는 바와 같이 회귀식의 추정값은 불편도를 잘 설명하고 있는 것을 알 수 있다. 도출된 회귀식은 작업부하수준과 노출비율 및 시간의 Log 함수를 고려한 것으로서 본 연구에서 가정한 변수들의 영향이 모두 반영이 되고 있다. 또한 시간의 변수는 상관관계 분석의 결과와 같이 로그함수를 취했을 경우 불편도를 잘 설명해 주고 있다. 이러한 결과를 통해 전체작업에서 시간의 구성비가 달라짐에 따라 그 불편도가 각기 달라지며, 이는 시간에 대한 고려가 이루어져야 함을 알 수 있다.

REBA Action level과 모델에 의한 추정값의 연속작업에서의 작업부하의 비교를 위해 상관관계 비교를 해본 결과, 다음의 그림 9, 10과 같았다.

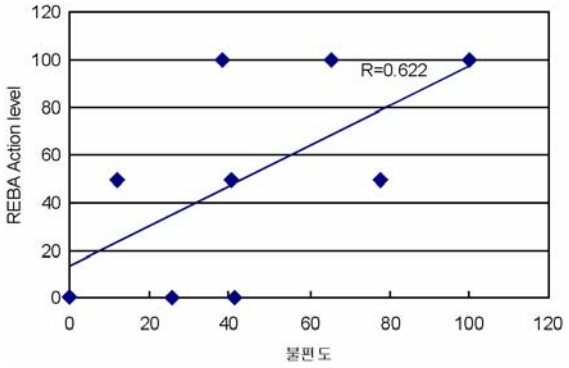

그림 9. REBA Action level과 불편도와의 상관관계

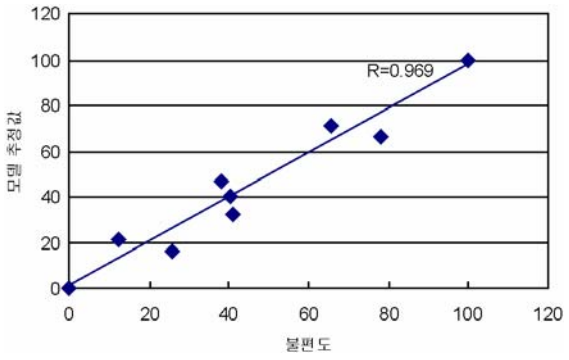

그림 10. 모델 추정값과 불편도와의 상관관계

그림 6, 7에서 보는 바와 같이 REBA Action level과 불편도의 상관계수는 0.622이었으며 본 연구에서 도출한 모델과 불편도의 상관계수는 0.969로서 본 연구의 결과를 바탕으로 한 모델이 연속작업에서의 주관적 불편도를 잘 설명해 주고 있다.

5. 논의 및 결론

본 연구는 연속작업에 있어 단위작업에 의한 부하의 정도가 전체 작업의 지각 불편도에 미치는 영향을 평가하고자 수행하였다. 분산분석 결과, 연속작업의 지각 불편도와 전체 작업시간, 작업부하수준 그리고 노출비율에 의하여 유의한 영향을 받는 것으로 나타났으며 이를 통해 본 실험에서 제시한 독립변수들이 연속작업 분석 시 고려될 요인임을 알 수 있었다. 특히 하나 이상의 단위작업으로 구성된 연속작업에 있어 지각 불편도는 단위작업 중 가장 유해한 작업부하보다는 각 단위작업의 평균적인 부하수준과 밀접한 관련이 있게 나타남으로써 연속작업에 있어 그것을 구성하고 있는 단위작업에 대한 고려가 이루어져야 함을 알 수 있었다. 또한 작업시간을 로그함수로 변환하여 반영하였을 때 주관적 불편도와의 상관관계가 높게 나타나 연속작업에서 시간의 흐름에 따라 불편도에 미치는 영향이 점차 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 Log 함수의 형태를 띄고 있지만, 전체 불편도 추정을 위해서는 반드시 작업시간을 고려해 주어야 함을 알 수 있다. 본 연구에서는 분산분석 결과 유의한 변수인 시간, 작업부하수준, 노출비율과 불편도와 상관관계가 높게 나타난 다양한 작업부하들을 통해 중회귀분석을 통해 연속작업 평가 모델을 도출할 수 있었으며 이에 대한 타당성 검증을 통해 새로운 평가 모델을 제시하였다. 특히, 같은 부하수준으로 구성된 단위작업의 조합이라 할지라도 구성 시간비가 다른 경우 전체 불편도에 추정을 위해서는 각 단위작업의 시간을 고려해 주어야 함을 알 수 있었으며, 이 경우 시간은 Log 함수 형태로 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 이러한 함수관계는 시간 및 피로 관련 연구에서 많이 이용되는 Weibull proportional hazards model이나 Weibull distribution과 비슷한 형태를 보이는 것이다(Schechtman and Bader, 1997).

현재까지의 작업자세 평가 및 불편도 관련 연구들의 대부분은 유해한 작업을 대상으로 한 정적인 작업분석에 그 초점이 맞추어져 연속작업에 대한 분석에는 한계가 있었다. 특히 단순반복작업이 아닌 실제 생산현장에서 이루어지는 다양한 작업에 대한 고려를 하기에는 어려움이 있었으며 여러 단위작업으로 구성된 일련의 연속작업의 전체 부하를 평가하기 위해서는 단위작업 중 최대부하로 평가하거나(Karhu et al., 1977), 각 단위 작업부하의 평균(Radwin et al., 1994; Lin and Radwin, 1998)으로 추정하여 왔다. 본 연구는 이러한 연속작업에서 일어나는 작업부하의 변화를 시간 및 노출비율을 고려함으로써 좀 더 다양한 작업의 변화를 고려하고자 하였다. 특히 시간의 흐름이 불편도에 미치는 영향을 파악함으로써 연속작업 평가에 시간을 고려하였을 때 주관적 불편도를 잘 반영할 수 있음을 알 수 있었고 단위 작업시간의 Log 값을 가중치로 작업부하평균을 고려하였을 때 전체 작업부하를 가장 잘 설명하는 것으로 분석되었다.

본 연구 결과는 작업장에서 발생하는 유해 작업에 대한 판단 및 전체 공정에서 작업자의 부담 정도를 파악하여 작업자의 추가배치 및 순환작업을 위한 기초 자료로 활용되어, 최근 들어 산업 안전 분야에서 큰 문제가 되고 있는 근골격계 질환의 예방에 도움이 되리라 기대되며 추후 본 연구를 바탕으로 성별 등의 작업자 특성, 한 손 작업 및 두 손 작업의 작업 특성을 고려한 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

참고 문헌

고려대학교 환경의학연구소, 근골격계질환 관련 유해요인 조사 및 교육, *용역보고서*, 기아자동차, 2004.

기도형, 외부부하, 상지 자세와 지속 시간에 따른 지각 불편도, *대한산업공학회지*, 30(2), 76-83, 2004.

나석희, 문찬영, 기도형, 정민근, 최대 자세 지속 시간을 이용한 OWAS, RULA, REBA와 PLAS의 평가, *2004 대한산업공학회 추계학술대회 논문집*, 2004.

박성준, 박재규, 최재호, 근골격계 부하 평가를 위한 2차원 자세 측정 시스템 개발, *대한인간공학회지*, 24(3), 43-52, 2005.

윤훈용, 결합된 수동물질취급 작업에서의 인체심리학적 연구, *공업경영학회지*, 22(50), 65-73, 1999.

이인석, 정민근, 기도형, 심물리학적 방법을 이용한 다양한 하지 자세의 부하 평가, *대한인간공학회지*, 21(4), 47-65, 2002.

이인석, 정민근, 최경임, 지각 불편도를 이용한 관찰적 작업자세 평가기법의 비교, *대한인간공학회지*, 22(1), 43-56, 2003.

Boussenna, M., Corlett, E. N. and Pheasant, S. T., The relation between discomfort and postural loading at the joints, *Ergonomics*, 25(4), 315-322, 1982.

Brown, R. and Li, G., The development of action levels for the 'Quick Exposure Check' (QEC) system, *Contemporary Ergonomics 2003, (ed. P.T. McCabe)*, London: Taylor & Francis, 41-46, 2003.

Cho, Y. J., Choe, J. H., Jung, E. S. and Choi, J. W., Comparison of calculation methods for composite REBA score based on symptom prevalence, *The 8th Korea-Japan joint symposium on ergonomics*, 420-423, 2005.

Corlett, E. N. and Bishop, R. P., A technique for assessing postural discomfort, *Ergonomics*, 19, 175-182, 1976.

Dul, J., Douwes, M. and Smitt, O., Ergonomics guidelines for the prevention of discomfort of static postures can be based on endurance data, *Ergonomics*, 37, 807-815, 1994.

Gescheider, G. A., *Psychophysics: method, theory, and application(2nd ed.)*, Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1985.

Hignett, S. and McAtamney, L., Rapid entire body assessment(REBA), *Applied Ergonomics*, 31(2), 201-205, 2000.

Hwang, C. L. and Yoon, K., *Multiple Attribute Decision Making: Method*

and Application, Springer-Verlag, New York, 1981.

Karhu, O., Kansi, P. and Kuorinka, I., Correcting working postures in industry: a practical method for analysis, *Applied Ergonomics*, 8(4), 199-2001, 1977.

Kilbom, A., Assessment of physical exposure in relation to work-related musculoskeletal disorders- what information can be obtained from systematic observations?, *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 20(spec), 30-45, 1994.

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.

Lin, M. L. and Radwin, R. G., Agreement between a frequency-weighted filter for continuous biomechanical measurements of repetitive wrist flexion against a load and published psychophysical data, *Ergonomics*, 41(4), 459-475, 1998.

Manenica, I., *The ergonomics of working postures*: *A technique for postural load assessment*, Taylor and Francis, London, 207-227, 1986.

McAtamney, L. and Corlett, E. N., RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, *Applied Ergonomics*, 24(2), 91-99, 1993.

Niebel, Benjamin W. and Freivalds, A., *Methods, Standards, & Work Design(11th ed.)*, McGraw Hill, 2003

Putz-Anderson, V. and Galinsky, T. L., Psychophysically determined work durations for limiting shoulder girdle fatigue from elevated manual work, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 11(1), 19-28, 1993.

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

Schechtman, H. and Bader, D. L., In vitro fatigue of human tendons. *Journal of Biomechanics*, 30(8), 829-835, 1997.

Snook, S. H. and Ciriello, V. M., The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces, *Ergonomics*, 34(9), 1197-1213, 1991.

Taksic, V., *The ergonomics of working postures: Comparison of some indices of postural load assessment*, Taylor and Francis, London, 278-282, 1986.

Walters, T., Applications manual for the revised NIOSH equation. *U.S. Department of Health and Human Services*, publication No. 94-110, 1994.

Zhang, L., Helander, M. G. and Drury, C. G., Identifying factors of comfort and discomfort in sitting, *Human Factors*, 38(3), 377-389, 1996.

◐ 저자 소개 ◑

❖ 박 재 규 ❖ jkpark@kaeri.re.kr
한남대학교 산업시스템공학과 학사
고려대학교 산업시스템정보공학과 석사
현 재: 한국원자력연구소 계측제어 · 인간공학연구부
관심분야: 인체역학, 안전공학, 작업생리, 산업안전

❖ 박 성 준 ❖ sjpark@nsu.ac.kr
성균관대학교 학사
포항공과대학교 석사, 박사
삼성자동차 중앙연구소 책임연구원
현 재: 남서울대학교 산업경영공학과 부교수
관심분야: 자동차 인간공학, 제품개발, 안전공학

❖ 정 의 승 ❖ sjpark@nsu.ac.kr
서울대학교 산업공학과 학사, 석사
Pennsylvania State Univ. 산업공학 박사 및 post-doc
현 재: 고려대학교 산업시스템정보공학 교수
관심분야: 인체공학적 제품설계, HCI, 인체모델 개발

논 문 접 수 일 (Date Received) : 2005년 10월 19일
논 문 수 정 일 (Date Revised) : 2005년 12월 14일
논문게재승인일 (Date Accepted) : 2006년 02월 10일