

## 자동차 조립 작업에서의 전신 자세 불편도 예측 모델

(Prediction model of whole-body postural discomfort for automobile assembly tasks)

이인석<sup>1</sup>, 정민근<sup>2</sup>, 기도형<sup>3</sup>, 김상호<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한경대학교 안전공학과, <sup>2</sup>포항공과대학교 기계산업공학부, <sup>3</sup>계명대학교  
 산업시스템공학과, <sup>4</sup>금오공과대학교 산업시스템공학과

### Abstract

관찰적 작업자세 평가기법은 각 관절의 자세를 관찰 기록하여 자세 부하를 평가하는 실용적인 인간공학적 작업평가 기법이다. 본 연구에서는 각 관절의 불편도 지수와 전신의 자세 부하의 관계성을 모형화하고, 전신의 작업자세 부하를 평가하는 방법론을 제시하였다.

자동차 조립공정의 대표적인 작업자세들을 대상으로 하여 정적인 자세의 심물리학적 부하를 전신에 대하여 평가하였다. 전신의 불편도는 비중립 자세를 취하고 있는 각 관절의 조합에 의해 영향을 받는다. 특히, 자동차 조립공정에서는 어깨 높이 이상의 작업을 대상으로 하는 경우에 어깨, 목, 허리, 손목 등에서 비중립 자세를 동시에 취하여 전신의 불편도가 큰 것으로 나타났다.

평가된 전신의 불편도와 각 자세의 관절별 불편도 지수의 관계를 다중선형회귀모형으로 모형화하는 것이 타당한 것으로 나타났다. 모형에서 전신 불편도에 가장 큰 영향을 미치는 관절은 어깨이며, 손목의 영향이 가장 적은 것으로 나타났다. 이 모형을 통해 작업자세 부하를 정량적으로 평가하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

### 1. 서론

표 1. 관찰적 작업자세 평가기법의 체계

	Part I	Part II
General scheme	Postural classification (body-joint stress level)	Assessment procedure (postural stress)
Existing methods	Ordinal scale based on literature	Postural stress based on expert opinion
Proposed method	Ratio scale based on body joint discomfort	Whole-body discomfort based on prediction model such as linear regression

부적절한 작업자세는 직업성 근골격계 질환의 유발과 높은 상관 관계를 가지는 것으로 많은 연구에서 보고되고 있다 (Bernard, 1997). 부적절한 작업자세를 개선하기 위해서는 작업자세로 인한 작업부하의 정도를 평가하는 것이 선행되어야 한다. 기존의 작업 자세 평가 기법은 크게 관찰적 기법, 장비를 이용한 직접적 측정 기법, 그리고 설문에 기반한 조사 기법 등이 있다 (Genaidy et al., 1994; Winkel and Mathiassen, 1994; Li and Buckle, 1999). 이러한 기법 중 관찰적 작업자세 평가 기법은 특별한 고가의 장비를 필요로 하지 않으며 작업을 방해하지 않기 때문에 산업 현장에서 가장 많이 이용되고 있다. 또한, 여러 연구에서 관찰적 기법이 직업성 근골격계 질환의 위험요인을 식별하고 평가하는 데 유용한 것으로 보고되고 있다 (Winkel and Mathiassen, 1994). 대표적인 관찰적 작업자세 평가 기법은 OWAS (Karhu et al., 1977), RULA (McAtamney and Corlett, 1993), REBA (Hignett and McAtamney, 2000) 등이 있다.

일반적으로 관찰적 작업자세 평가기법은 작업자세 분류체계와 부하수준 평가체계로 구성되어 있다 (표 1). 작업자세 분류체계는 관절별로 운동 범위를 몇 개의 구역으로 구분한 것으로, 같은 구역의 자세는 같은 부하 수준을

유발하는 것으로 정의된다. 관찰자는 작업자세 분류체계를 기준으로 하여 작업자세를 관찰하여 기록하며, 작업자세의 부하는 평가체계를 따라 정의하게 된다. 작업자세의 부하는 각 관절에서의 자세별 부하를 통합한 하나의 부하 지수로 정의될 수 있는데, 기존의 기법 중 일부에서만 이러한 통합적인 부하 평가 체계가 제시되고 있다. 특히, 이들 기법들은 전문가의 주관적 판단에 의해 평가체계를 구축하고 있어 객관적인 근거가 미약한 것으로 나타나고 있다 (Genaidy et al., 1994; Juul-Kristensen et al., 1997).

작업자세는 인체의 여러 관절의 자세의 조합에 의해 정의된다. 따라서, 전신의 작업자세 부하는 각 관절의 비중립 자세에 의한 부하에 의해 영향을 받게 된다. 기존의 연구에서는 각 관절에서의 부하가 전신의 부하에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 관계성이 충분히 고려되지 못하고 있다.

본 연구에서는 자동차 조립공정의 대표적인 작업자세를 대상으로 하여 작업자세의 심물리적 부하를 평가하였다. 그리고, Chung et al. (2001)이 제안한 각 관절에서의 불편도 지수를 이용하여 전신의 불편도와 각 관절의 불편도 지수간의 관계성을 분석하고, 관절동작으로부터 전신의 작업자세 부하를 예측하는 모델을 제안하였다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 자동차 조립공정에서 많이 발생하는 42개 작업자세에 대하여 정적인 자세의 심물리학적 부하를 평가하는 실험을 수행하였다. 실험에는 근골격계 질환을 경험하지 않은 건강한 남자 대학생 17명이 피실험자로 참여하였으며, 이들의 평균 연령, 신장, 체중은 각각  $22.6 \pm 1.1$ 세,  $173.0 \pm 3.5$ cm,  $64.4 \pm 4.4$ kg이었다.

실험에 포함된 작업자세는 자동차 조립공정의 특성을 분석한 결과를 바탕으로 42개 자세가 선정되었으며(김상호 등, 1998), 각 자세는 Chung et al. (2001)이 발표한 작업자세 분류체계에 따라 정의되었다(표 2 참조).

피실험자들은 주어진 자세를 1분간 유지한 후 자신이 느낀 부하의 정도를 숫자로 표

현하였다. 주관적 불편도 평가는 심물리학 연구에서 널리 이용되고 있는 free-modulus magnitude estimation 기법을 이용하였다 (Gescheider, 1985). Magnitude estimation 기법을 이용하기에 앞서 피실험자들의 비율척도 능력을 검증하기 위한 예비 실험이 numeric estimation과 line production 기법을 이용하여 수행되었다. 17명의 피실험자들은 모두 비율척도 능력을 보유한 것으로 나타났다.

본 실험은 모의 자동차 조립공정 작업장에서 수행되었다. 모의 작업장은 자동차의 높낮이를 조절하여 자동차 차체 각 부위에서의 조립작업이 가능하도록 설계되었다. 피실험자들은 각 자세별로 지정된 자동차 조립 부위에서 자동차 조립 작업을 모사하였으며, 주어진 자세를 1분간 유지하였다. 모든 피실험자들은 무작위화된 순서에 따라 자세를 취하였으며, 각 자세 평가마다 3분의 휴식을 취하고, 매 2시간 마다 15분 이상 휴식을 하였다.

Free-modulus magnitude estimation 기법에 의해 구한 자료는 각 평가자마다 다른 기준을 따르기 때문에 통계적 분석을 위해서는 표준화되어야 한다 (Gescheider, 1985). 본 연구에서는 각 피실험자별로 최대값을 기준으로 하여 다음과 같은 방법으로 각 자료를 표준화하였다.

$$NV_{ij} = (X_{ij} / \text{Max}_i) \times 100$$

where i: subject number;

j: posture number;

$NV_{ij}$ : normalized value of the ith subject's discomfort rating for the jth posture;

$X_{ij}$ : rad datum of the ith subject's discomfort rating for the jth posture;

$\text{Max}_i$ : the ith subjects's maximum discomfort rating.

## 3. 결과

### 3.1 상관 분석

각 자세에 대한 전신불편도와 관절불편도간의 상관 관계와 각 관절의 불편도간의 상관 관계를 Pearson 상관계수를 산출하여 분석하

표 2. 작업자세 분류체계 및 관절별 불편도 지수

Body part	Category	Code	Range (degree)	Discomfort score
Arm	Neutral	N	0-45 (F), 0-20(E)	1
	Moderate Elevation	ME	45-90	3
	Severe Elevation	SE	90-135	5
	Extreme Elevation	EE	>135	8
	Extension	E	>20	5
Trunk	Neutral	N	0-30 (F), 0-10 (E)	1
	Moderate Flexion	MF	30-60	4
	Severe Flexion	SF	60-90	7
	Extension	E	>10	7
	Lateral Bending/Rotation**	LBR	>10 (LB) >25 (R)	+5 (+1)
Legs	Standing	STD	0-30	1
	Moderate knee flexion	MKF	30-60	2
	Severe knee flexion	SKF	60-90	3
	Squatting	SQ	>90	3
	Sitting	ST		0.5
	Kneeling	KNL		2
	Unbalance or Awkward**	UA		+1
Wrist	Neutral	N	0-25 (F, E)	1
	Flexion	F	>25	3
	Extension	E	>25	3
Neck	Neutral	N	0-20 (F), 0-25 (E)	1
	Moderate Flexion	MF	20-45	2
	Severe Flexion	SF	>45	4
	Extension	E	>25	4
	Lateral Bending/Rotation**	LBR	>20	+2 (+1)

\*Discomfort scores for two wrists or arms are separately assessed and summed together. When two wrists or arms are positioned in the neutral range, the discomfort score is 1.

\*\*Adjusting factors: When these postures are adopted with other joint motions simultaneously, the discomfort score for the complex posture is obtained by adding two scores. For example, in the neck and trunk, additional discomfort score of 1 is added to it when either flexion or extension is adopted simultaneously with LBR.

였다(표 3). 불편도는 실험을 통해 피실험자들이 평가한 불편도를 표준화한 값이며, 각 관절의 불편도는 표 2의 작업자세 분류체계에서 제시된 값이다.

전신불편도는 어깨, 손목, 목의 불편도와 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 허리와 다리의 불편도와는 상관관계가 유의하지 않은 것으로 나타났다( $\alpha=0.05$ )(표 3).

관절동작의 불편도 간에는 어깨의 불편도가 손목과 목의 불편도와 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 허리의 불편도와는 음의 상관관계가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다( $\alpha=0.05$ )(표 3).

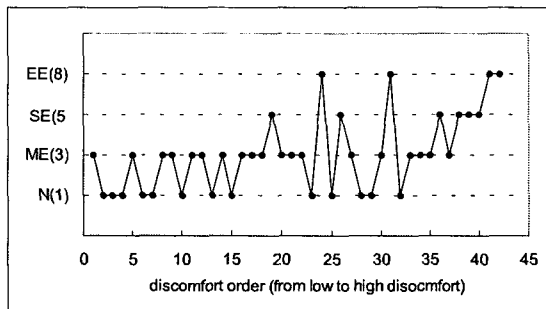
그림 1은 전신의 불편도 순위에 따른 어깨와 허리의 불편도 변화를 나타내고 있다. 어깨의 불편도는 전신 불편도가 증가할수록 증

가하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 허리의 불편도는 전신의 불편도의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이지 않고 있다.

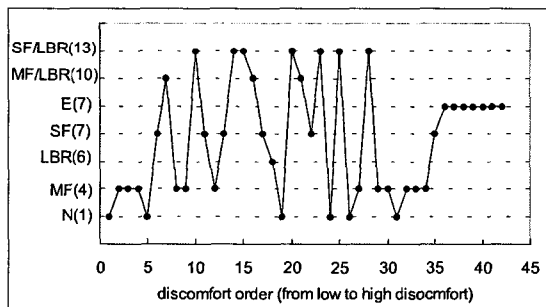
표 3 전신 불편도와 관절별 불편도간의 상관 분석 결과

	Shoulder	Trunk	Legs	Wrist	Neck
Discomfort	0.60*	0.10	0.22	0.32*	0.58*
Shoulder	1	-0.36*	-0.14	0.39*	0.39*
Trunk	.	1	-0.06	-0.24	-0.11
Legs	.	.	1	-0.20	0.05
Wrist	.	.	.	1	0.29

\*유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 유의함.



(a) Shoulder



(b) Trunk

그림 1. 전신불편도 순위에 따른 어깨와 허리의 불편도 지수 변화

### 3.2 회귀 분석

전신의 불편도와 각 관절의 불편도 지수 간의 관계성을 분석하기 위한 다중선형회귀분석을 수행하였다. 회귀모형은 전신 불편도를 종속변수로 하며, 각 관절의 불편도 지수를 독립변수로 하여 구성되었다. 표 4는 회귀분석을 수행한 결과이며, 결정계수  $R^2 = 0.71$  이었다. VIF (Variation Inflation Factor)를 구한 결과 평균 VIF가 1.25로 독립변수간의 다중공선성

은 존재하지 않는 것으로 나타났다.

선형회귀모형에서 각 관절의 불편도 지수의 전신 불편도에 대한 영향성을 분석하기 위하여 각 회귀계수를 각 관절이 가지는 최대 불편도 지수로 나누어 표준화하였다(표 4). 표준화된 회귀계수는 어깨가 가장 큰 값(36.8)을 보였으며, 허리, 다리, 목의 회귀계수는 유사한 값(22.2 - 24.7)을 보였다. 손목의 회귀계수는 6.3으로 가장 적은 값을 보였다.

표 4. 회귀분석 결과

Independent variables	Estimated coefficient	Maximum discomfort scores	Normalized coefficients
Intercept	6.32	-	-
Shoulders	2.30	16	36.79
Trunk	1.90	13	24.69
Legs	5.86	4	23.45
Wrists	1.05	6	6.28
Neck	3.17	7	22.18

## 4. 논의 및 결론

### 4.1 관절 동작과 전신 불편도의 관계

정적인 자세의 부하는 각 관절의 비중립 자세의 조합에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 비중립 자세를 취하고 있는 관절의 수가 많을수록, 그리고 비중립 각도의 정도가 클수록 전신의 불편도가 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구의 대상 작업인 자동차 조립공정에서는 어깨 높이 이상에 위치하고 있는 작업물을 대상으로 하는 경우에 자세 부하가 큰 것으로 나타났다. 이러한 작업에서는 팔을 어깨높이 이상으로 들뿐만 아니라, 목, 허리, 손목 등에서 신전 자세를 동시에 취하게 되기 때문에 전신의 불편도가 높은 것으로 나타났다. 이는 전신 불편도가 어깨, 목, 손목의 불편도 지수와 양의 상관관계를 가지는 것으로부터 알 수 있다.

자동차 조립공정에서는 허리에서 비중립적인 자세를 취하는 경우에는 다른 관절이 상대적으로 중립자세를 취하는 경우가 많다. 전신의 불편도는 허리의 불편도 지수와 뚜렷한

관계성을 보이지 않는 것은 이러한 이유에 기인하는 것으로 보인다. 그러나, 이 결과는 자동차 조립공정의 일부 자세만을 대상으로 한 것이기 때문에 허리의 자세와 전신의 불편도와의 일반적 관계성으로 해석되기 어려우며, 추후 연구의 필요성이 있는 것으로 보인다.

#### 4.2 관절 동작 불편도와 전신 불편도의 선형 관계

각 관절의 불편도 지수와 전신의 불편도 간의 관계는 다중선형모형에 의해 전신의 불편도 변동의 약 71%가 설명되어져 선형 모형이 타당성을 가지는 것으로 나타났다. 각 관절의 전신 불편도에 대한 영향은 어깨 관절이 가장 큰 것으로 나타났으며, 손목의 영향이 가장 적은 것으로 나타났다.

이 결과로부터 자동차 조립 공정의 전신의 작업자세 부하를 각 관절의 자세로부터 예측하는 것이 가능한 것으로 나타났다. 그러나, 이 선형 모형은 자동차 조립 공정의 일부 자세를 대상으로 하여 구축되었기 때문에 실제 자동차 조립 공정의 다양한 작업 자세를 대상으로 한 검증 연구가 필요하다. 그리고, 자동차 조립공정과 다른 유형의 작업에 대해서는 적용의 어려움이 있을 것으로 예측된다. 그러나, 본 연구에서 이용된 연구 방법론을 적용하면 다양한 작업 특성에 대한 전신의 작업자세 평가 모델을 구축하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

김상호, 정민근, 기도형, 이인석, 자동차 조립 공정에서의 작업자세 특성, 1998, 98 대한인간공학회 춘계학술대회논문집, 31-35.

Bernard, B. (Ed.), 1997, Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, low backs, DHHS (NIOSH) Publication No. 97-141, US Department of Health and Human Services.

Chung, M. K., Lee, I., Kee, D., Kim, S. H., 2001, A Postural Workload Evaluation

System Based On A Macro-Postural Classification, CD-ROM proceedings of the International conference on Computer-aided ergonomics and safety (CAES 2001).

Genaidy, A. M., Al-shedi, A. A. and Karwowski, W., 1994, Postural stress analysis in industry. Applied Ergonomics, 25, 2, 77-87.

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

Hignett, S. and McAtamney, L., 2000, Rapid Entire Body Assessment (REBA), Applied Ergonomics, 31, 201-205.

Juul-Kristensen, B., Fallentin, N. and Ekdahl, C., 1997, Criteria for classification of posture in repetitive work by observation methods: A review, International Journal of Industrial Ergonomics, 19, 397-411.

Karhu, O., Kansi, P. and Kuorinka, I., 1977, Correcting working postures in industry: A practical method for analysis, Applied Ergonomics, 8, 4, 199-201.

Li, G. and Buckle, P., 1999, Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods, Ergonomics, 42, 5, 674-695.

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

Winkel, J. and Mathiassen, S. E., 1994, Assessment of physical work load in epidemiologic studies: concepts, issues and operational considerations, Ergonomics, 37, 6, 979-988.