

인간공학적 작업공간 설계를 위한 CAD 응용방안

(Application of an Ergonomic Design of Work space Layout Using 3-Dimensional Human Model)

이 먼 우*
이 달 호*
장 성 록*

Abstract

The purpose of this paper is to develop a 3-dimensional human model, an ergonomic CAD (Computer-Aided Design) system which would be very helpful in ergonomic design.

An interactive program was developed, in which a user could change layout, body size, skin volume, and posture of the human model.

As an example, effect of inclination of a steering wheel on visibility of a display panel was demonstrated.

The result showed that ergonomic design can be aided by the 3-dimensional human model, and by the perspective graph by which design and evaluation process can be carried out more effectively.

1. 서 론

작업공간을 설계하는데 일반적으로 사용되어 온 설계 평가방법은, 도면작업에 의해 결정된 설계안에 따라 실물모형이나 시제품을 제작하고, 피실험자를 통하여 모의실험을 수행하는 것인데 [6] 다음과 같은 단점을 가지고 있다. [7]

1) 설계의 결함이 모의실험 전까지 발견되지 않을 경우 수정지연으로 인한 비용을 감수해야 한다.

2) 한정된 수의 피실험자에 의해 모의실험이 이루어지므로 작업자 모집단 전체를 고려한 평가가 이루어질 수 없다.

이러한 평가방법의 단점을 보완하고 작업공간 설계에서 작업자의 작업효율성, 안전성, 안락도를 증대시키기 위해서는 가시성(visibility), 기기 조작성(reach capability), 신체적합성(fitness)과 같은 인간 공학적인 요소를 고려한 CAD (Computer-Aided Design)시스템의 적용이 요청된다. [1, 2, 3, 5] 이러한 CAD 시스템은 작업자와 작업공간의 상호작용에 대한 전산화된 모의실험 및 공간상황의 도면제시를 통하여 설계를 평가하고 수정하는 도구로 사용된다. 또한 작업공간과 작업자의 공간상황을 CAD시스템의 투시도를 통하여 관찰함으로써, 설계자는 양자의 상호관계에 대한 주관적인 평가를 내릴수 있

*서울대학교 工科大学 産業工學科

울뿐 아니라 작업공간이나 작업자의 신체크기 그리고 자세를 변화시킴으로서 발생 가능한 모든 공간상황을 고려할 수 있게된다.

이에 따라 본 연구는 작업공간 설계의 주관적인 평가를 위한 도면제시(graphical representation)시스템의 주요 구성요소로서 3차원 인체 모형과 작업공간의 투시도 작도를 위한 routine을 개발하는데 그 목적이 있다.

2. 인간공학적 CAD시스템 연구의 배경

2.1 관절모형

고정된 한 지체(body segment)에 대하여 인접한 다른 지체의 상대적인 활동은 관절에서 일어나며 뼈의 접촉면의 기하학적 구조나 근육신장 등에 의하여 다양하게 변화한다. 각 관절에 관련된 활동과 그 범위를 표현하기 위해서는 관절의 운동학적 모형이 수립되어야 한다. 관절모형은 1~6의 자유도(degree of freedom)를 갖는다. 여기서 자유도란 고정된 지체에 대하여 유동적인 지체의 상대적 위치를 정의하기 위해서 필요한 독립변수의 갯수를 말한다. 일반적으로 사용되고 있는 관절모형에는 1, 2, 3, 6-자유도 모형이 있으며 각 관절모형에서 지체의 위치를 결정짓는 변수들은 다음과 같다.

1) 1-자유도 외권모형(revolute model)

하나의 회전축을 중심으로 했을 때 지체의 회전각도에 의해 결정된다.

2) 2-자유도 평면모형(planar model)

한 평면에서 지체의 회전중심의 위치를 나타내는 좌표 X, Y와 회전각도에 의해 결정된다.

3) 3-자유도 구형모형(Spherical model)

지체의 vector 방향을 나타내는 두개의 각도와 축 회전각도에 의해 결정된다.

4) 2-자유도 구형모형: 축회전 없음.

지체의 vector 방향을 나타내는 두개의 각도에 의해 결정된다.

5) 2-자유도 구형모형: 축회전 있음

1-자유도 외권모형의 변수와 지체의 축회전에 의해 결정된다.

6) 6-자유도 공간모형(Spatial model)

지체의 상대적 위치를 결정하기 위한 최대의 자유도는 6이며 6개의 변수가 모두 사용된다.

2.2 3차원 투시도

3차원 투시도란 인간이 어떤 물체를 볼때 느끼는 공간적인 인식을 2차원적인 평면을 통하여 인식할 수 있도록 표현한 도면이다. 이때 시점의 위치를 X축, Y축, Z축 상에 놓으면 측면도, 정면도, 평면도가 나타나고 이와같이 시점의 위치를 물체의 주위로 이동시키면서 투영시키면 물체 주위 어느 쪽에서도 물체를 관찰할 수 있는 효과를 얻는다. 투시도의 이러한 특성을 이용하여 인간의 눈에 비치는 광경을 투시도로 나타냄으로써 작업공간의 시야를 평가하는 기법이 SAMMIE에 개발되어 적용되고 있다. [2, 3]

2.3 가시도 도면과 시점

가시도 도면은 작업공간에서 작업자의 시야에 들어오는 광경을 투시도로 나타낸 것을 말한다. 작업공간의 구조물, 내부 장치등에 의해 작업자의 시야가 방해되어 보이지 않는 부분이 발생할 수 있는데 이러한 작업공간 배치는 시각정보의 손실과 함께 작업효율을 저하시킨다. 설계의 구상단계부터 이러한 가시도의 문제점을 파악하고 설계에 반영하기 위해서는 가시도 도면이 필요하다. [8]

작업공간 상에서 작업자 시점의 위치를 결정하는 것은 작업공간의 가시도 도면의 작도에 매우 중요하다. 왜냐하면 시점의 위치가 변함에 따라 작업자에게 보이는 광경이나 시야 방해로 보이지않는 부분이 변하기 때문이다. 즉 작업공간의 가시도는 시점의 위치에 많은 영향을 받는다. 따라서 작업공간의 재배치로 작업자의 시점을 조절하므로써 가시성의 향상을 기할 수 있다.

예를 들어 운전자의 경우 운전석의 높이를 조절함으로써 하향시계(down vision)의 향상을 기할 수 있다.

시점을 결정하는 방법으로는 3차원 인체 모형에 의한 결정 방법과 측정자료에 의한 결정방법이 있다. [3] 그런데 후자의 방법은 시점위치에 대한 기존 자료가 부족하고 특정한 조건에서 자료가 측정되기 때문에 적용범위에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 3차원 인체 모형을 이용한 시점위치의 결정 방법을 사용하였다.

3. 인간자세의 표현 방식에 관한 연구내용

3.1 Link-pivot 시스템

인체의 신체활동에 관한 분석에서 실제적인 신체구조를 그대로 고려한다는 것은 복잡하고 비효율적이다. 따라서 신체구조를 기계와 연관시키는 공학적인 접근방법의 하나로 link-pivot 시스템의 도입이 필요하다. Link-pivot 시스템에서 link는 pivot point를 잇는 최단거리의 직

선을 말하는 것이고 pivot point는 관절에서 먼 link의 한쪽 끝이 회전할때 가까운 끝에서의 회전중심으로 정의된다. 본 연구에서 사용한 link pivot 시스템은 Figure 3-1과 같다.

Link-pivot 시스템에서 신체깃수, 신체자세는 각각 link의 길이, 위치에 의해 결정되며 그 결정방법은 다음과 같다.

1) Link 길이의 결정

Link 길이는 고려 대상이 되는 모접단에 대한 인체측정 자료를 사용하거나 특정한 피실험자의 인체측정치를 사용한다.

2) Link 위치의 결정

Link 위치는 link와 관련된 joint의 특성에 차이가 있기 때문에 link의 종류에 따라 결정방법이 다르다. 본 연구에서는 각 관절에 대한 모형을 Table 3-1과 같이 구분하여 사용하였다.

Table 3-1. Used Pivots and Links

관 절 모 형	관절의 종류	관련link(순서대로)
(c) 3-자유도구형	cervical, shoulder, hip	cervical, eye, upper arm, upper leg
(d) 2-자유도구형 (축회전 없음)	lumbar, wrist, ankle, T4	lumbar, hand, foot, shoulder
(e) 2-자유도구형 (축회전 있음)	thoracic, elbow	thoracic, lower arm
(a) 1-자유도관	knee, hip	lower leg, pelvic

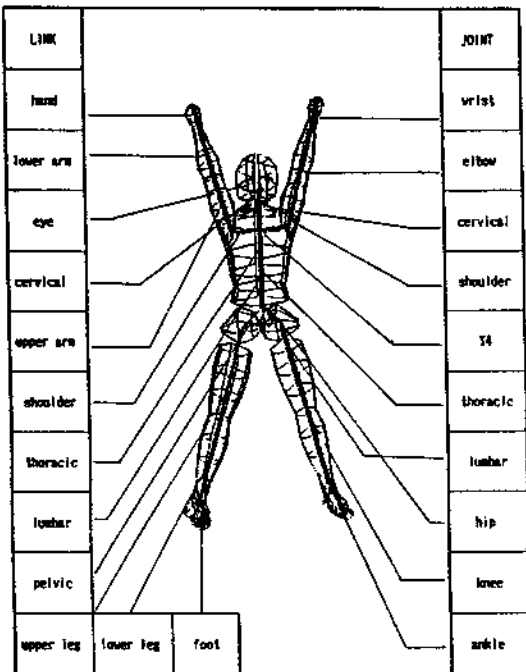


Figure 3-1. Link-pivot System of Human Model

3.2 신체부피 (Skin Volume)

작업공간과 작업자간의 공간적인 관계에서 신체부피는 고려되어야 할 중요한 요소이다. 본 연구에서 개발한 신체부피의 표현방식은 link에 수직한 단면과 단면을 연결한 철사골격(wire flame)의 형태로서 신체의 단면을 타원 상의 8개점으로 근사시켰다. 이 때 타원의 장축, 단축의 길이는 각 신체부위별 두께, 너비의 인체측정자료가 반영되며 이로써 신체부피가 결정된다. 따라서 타원의 장축, 단축의 길이를 변화시킴으로서 신체유형(표준형, 비만형)에 따른 신

체부피도 사용자의 입력에 의해 임의로 조절할 수 있다.

단면을 이루는 8 개 점의 3 차원 공간좌표는 다음의 계산과정에 따라 결정된다.

1) 단면의 link 상의 위치결정

Link의 길이를 1로 보았을 때 link의 끝에서 단면중심까지의 거리를 백분율로 나타냄으로서 link 상의 단면의 위치를 결정한다. Link의 끝을 원점에 놓고 link를 Z축에 위치시켰을 때 link의 길이, 단면중심 위치의 백분율과 장축, 단축의 길이에 따라 단면을 이루는 8 개 점의 공간좌표가 계산된다. 이때 8 개 점의 공간좌표를 $X_i, Y_i, Z_i, (i=1 \text{ to } 8)$ 라 한다.

2) Link의 방향과 축회전에 따른 단면의 좌표 이동

Link 방향의 결정변수 값이 p, q이고 link의 축회전 변수 값이 r일때 단면의 좌표이동을 위한 계산과정은 다음과 같다.

(A) Z축 방향의 시계방향으로 $-p+r$ 만큼 축회전시킨다.

이는 다음의 (c)에서의 축회전으로 발생하는 지체의 축회전 효과를 상쇄시키기 위하여 시계반대방향으로 p만큼 축회전시키고 지체의 축회전 r만큼 다시 축회전시키는 것이다. 좌표이동을 위한 계산과정은 식(3.1)과 같다.

$$(X_i, Y_i, Z_i) = (X_i, Y_i, Z_i) \begin{vmatrix} \cos(-p+r) & \sin(-p+r) & 0 \\ -\sin(-p+r) & \cos(-p+r) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.1)$$

(B) Y축 방향의 시계방향으로 q만큼 축회전시킨다.

이는 지체의 vector 방향 결정변수인 극 좌표 값 q에 대한 지체의 이동에 따라 타원의 좌표를 이동시키는 것이며 계산과정은 식(3.2)와 같다.

$$(X_i, Y_i, Z_i) = (X_i, Y_i, Z_i) \begin{vmatrix} \cos(q) & 0 & -\sin(q) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(q) & 0 & \cos(q) \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

(C) Z축 방향의 시계방향으로 p만큼 축회전시킨다.

이는 지체의 vector 방향 결정변수인 극좌표 값 p에 대한 지체의 이동에 따라 타원의 좌표를 이동시키는 것이며 계산과정은 식(3.3)과 같다.

$$(X_i, Y_i, Z_i) = (X_i, Y_i, Z_i) \begin{vmatrix} \cos(p) & \sin(p) & 0 \\ -\sin(p) & \cos(p) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.3)$$

3) Link의 위치에 따른 단면의 좌표 이동
Link의 끝의 좌표값이 (X_p, Y_p, Z_p) 라 하면 $(X_i, Y_i, Z_i) = (X_i, Y_i, Z_i) + (X_p, Y_p, Z_p) \quad i=1 \text{ to } 8$ 이다.

3.3 투시도

본 연구에서는 인간공학적 CAD 시스템의 기본적인 기능의 하나인 도면좌도 기능을 만족시키기 위하여 투시도 결정 변수인 시점의 위치, 도면의 크기를 사용자 임의로 조절할 수 있는 투시도 좌도를 위한 대화형 프로그램을 개발하였다.

시점의 위치는 시점의 vector 방향과 원점에서의 거리에 의해 결정된다. 시점의 위치가 결정되면 이에 따라 시선의 방향은 시점에서 원점으로 향하게 된다. 여기서 시점의 vector 방향은 투시 방향을 결정하며 시점의 원점에서의 거리는 원근의 정도를 결정한다. 따라서 시점의 vector 방향에 따라 정면도, 평면도, 측면도, 투시도가 작도되며 Figure 3-2에 인체모형에 대한 도면 출력결과가 나타나 있다. 또한 시점의 원점으로부터의 거리에 따라 원근이 없는 도면과 원근이 있는 도면을 작도할 수 있다. 시점의 거리가 멀수록 원근의 정도는 경감된다. Figure 3-2의 도면들은 원근이 없는 도면이며 원근이 있는 도면의 대표적인 예는 다음에 설명될 가시도 도면이다.

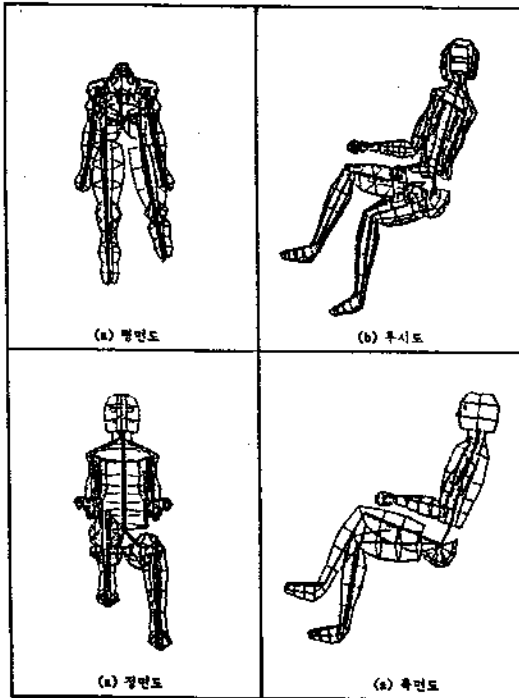


Figure 3-2. Graphical Representation of Human Model

3. 4 가시도 도면(Visibility Graph)

가시도 도면의 작도는 시점이 작업공간내에 위치하고, 시계내의 작업공간만을 대상으로 하기 때문에 일반적인 투시도 작도와 다르다. 가시도 도면 작도에 대한 흐름도가 Figure 3-3에 나타나 있다. 이 흐름도에서 첫번째부터 네번째 항목까지가 결정되면 다음과 같은 계산 과정을 통하여 가시도가 작도된다.

이 때

$(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)$: 모서리 양끝의 공간좌표

(X_e, Y_e, Z_e) : 시점의 공간좌표

p, q : 시선방향(극좌표)

A, B : 좌우, 상하 시각

(A) 시선상의 한 점이 원점이 되도록 시점과 작업공간의 좌표를 이동시킨다. 이에 시선상의 임의의 한점의 좌표 (X_o, Y_o, Z_o) 의 계산식은 다음의 식(3.4)와 같다.

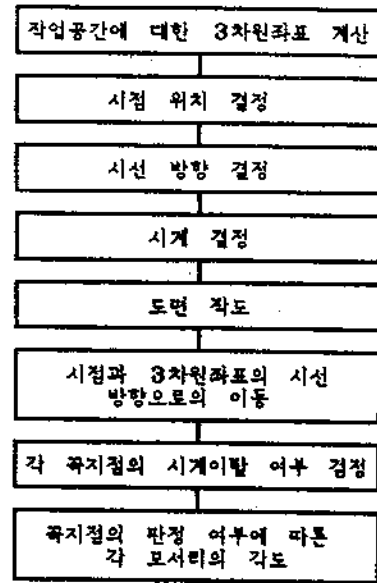


Figure 3-3. Flowchart of Visibility Graph Drawing

$$X_o = X_e + 1 \sin(q) \cos(p)$$

$$Y_o = Y_e + 1 \sin(q) \sin(p) \quad - (3.4)$$

$$Z_o = Z_e + 1 \cos(q)$$

시선이 원점을 향하도록 시점과 작업공간의 좌표를 이동시킨다. 좌표이동 계산식은 다음의 식(3.5)와 같다.

$$(X_1, Y_1, Z_1) = (X_1, Y_1, Z_1) - (X_o, Y_o, Z_o)$$

$$(X_2, Y_2, Z_2) = (X_2, Y_2, Z_2) - (X_o, Y_o, Z_o) \quad - (3.5)$$

$$(X_e, Y_e, Z_e) = (X_e, Y_e, Z_e) - (X_o, Y_o, Z_o)$$

(B) 각 꼭지점이 시계의 안 또는 밖에 있는지를 점정한다.

이때 새로운 좌표계를 정의하고 그에 따라 좌표값을 변환시킨다. 새로운 좌표계는 시점을 원점으로 하고 Z축이 본래의 좌표계의 원점을 향한다. 이러한 좌표변환은 공간좌표의 투시도 좌표변환 과정의 일부로 3차원 투시도(2.2) 작도시에 계산된다. 새로운 좌표계에 따른 모서리 한쪽 끝점의 좌표를 $(XX1, YY1, ZZ1)$ 이라 한다. 그러면

$$\frac{XX1^{**2}}{U^{**2}} + \frac{YY1^{**2}}{V^{**2}} > 1 \text{ 이면 시계}$$

안에 위치, 아니면 시계밖에 위치

여기서 $U = ZZ1 \tan(A)$, $V = ZZ1 \tan(TA)$

(B)

(C) 한 모서리를 이루는 두 꼭지점의 판정여부에 따라 다음과 같은 모서리 작도가 수행된다.

- (1) 두 점이 모두 시계 안에 있는 경우
두점의 투시도 2차원 좌표를 계산하고 두점을 연결하는 선을 긋는다.
- (2) 두 점이 모두 시계 밖에 있는 경우
모서리를 그리지 않는다.

(3) 두 점이 각각 시계의 안과 밖에 있는 경우 모서리와 시계가 만나는 점을 계산하고 이를 시계 안의 점과 함께 투시도 2차원 좌표로 변환한 다음 두 점을 연결하는 선을 긋는다.

Figure 3-4에 운전대 기울기가 15도, 30도, 45도 일 때 5th, 50th, 95th percentile 운전자가 보는 광경에 대한 가시도 도면이 나타나 있다. 이러한 가시도 도면의 출력결과로 주관적인 설계평가의 자료를 얻을 수 있으며 평가 결과 운전대 기울기의 제한 범위내에서 기울기 45도 일 때 계기판의 가시도가 가장 좋은 것을 알 수 있다.

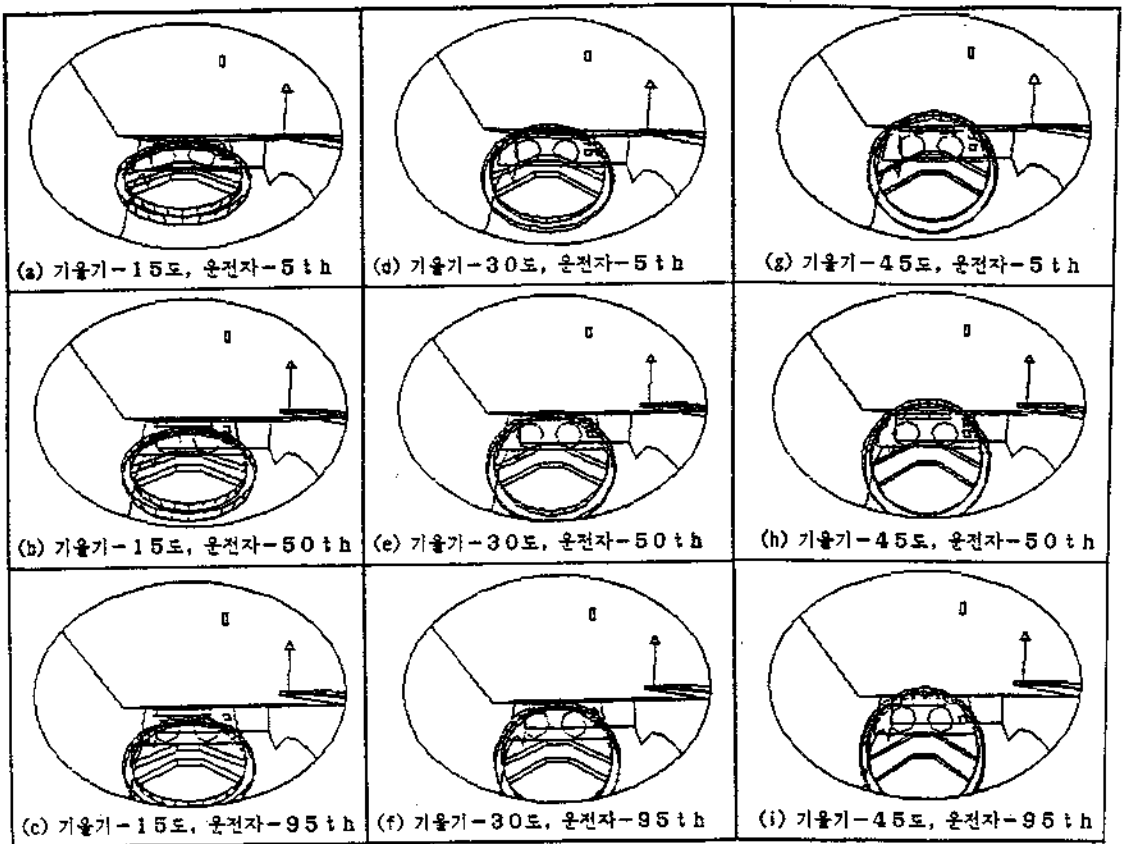


Figure 3-4. Example of Visibility Graph

4. 결 론

본 연구에서는 도면제시에 의한 정성적인 평가 방안과 그 적용사례를 연구하였다. 이 과정에서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1) 작업자 모집단의 신체치수를 반영하기 위한 link 길이의 조절기능과 작업특성에 따른 자세 변경을 위한 자세조절 기능을 갖는 link-pivot system이 개발됨으로써 운동학적(kinematic) 인체모형 개발의 연구를 발전시키기 위한 기초를 마련하였다. 또한 각 지체의 운동특성을 반영한 관절모형을 link-pivot system에 적용함으로써 abduction, adduction, supination, pronation 등 여하한 지체의 운동도 표현할 수 있음을 알 수 있다.

2) 인체모형의 신체 부피(skin volumn)를 표현할 수 있는 기하학적 계산 과정이 개발되었으며 신체 부피의 크기가 조절되므로 신체유형, 피복효과의 반영이 가능함을 알 수 있다.

3) 투시도 작도 방법의 개발로 CAD system의 기본적인 도면작도(graphic) 기능을 수행할

수 있다. 또한 가시도 도면작도 방법의 개발로 가시도 평가의 기본적인 도면작도 기능과 일부분의 투시도만을 그리는 window 기능이 가능하다. 이러한 투시도, 가시도 도면을 제공함으로써 작업공간의 광범위한 투시효과를 얻을 수 있으므로 설계자의 공간인식력을 향상시키고 설계 평가 및 판단력에 도움을 준다.

4) 사례 연구로부터 작업공간 배치에서 발생할 수 있는 심각한 시각정보 측면의 결함을 설계의 구상단계에서 제거하는데 인체모형과 가시도 도면이 효과적인 설계도구로서 사용될 수 있음을 알 수 있다.

5) 본 연구에서 개발된 인체모형과 가시도 도면의 작업공간 설계에의 적용은 객관적이고 정량적인 설계 기준을 제시하기보다 공간상황의 투시도에 의한 주관적이고 정성적인 평가 자료를 제공함에 의의가 있다. 또한, 설계의 구상단계부터 인간공학적 측면이 고려될 수 있고, 설계의 신속한 반복수정 작업이 가능하여 경제적이고 효율적인 설계도구로서의 기능이 가능하다.

References

1. Barnes, R. M. *Motion and time study*. 7th ed. Jones Wiley & Sons, New York, 1980.
2. Bonney, M. C. et al. "Man-machine interaction in work systems," *International J. of Production Research*, vol. 17, no. 2; 619-629, 1979.
3. Case, K. et al. "Design of mirror systems for commercial vehicles," *Applied Ergonomics*, vol. 11, no. 4; 199-206, 1980.
4. Hay, J. G. et al. *The anatomical and mechanical bases of human motion*, Prentice Hall, New Jercey, 1982.
5. Jones, J. C. "Layout of workspaces," *Applied Ergonomics*, vol. 1, no. 3; 151-158, 1970.
6. Kilpatrick, K. E. "A biomechanical model for workplace design," *Human Factors*, vol. 14, no. 3; 237-247, 1972.
7. Levis, J. A. et al. "The impact of computer aided design on preconcept package design and evaluation," *Transactions Research*, vol. 2; 356-364, 1970.
8. Porter, J. M. et al. "A computer generated three dimensional visibility charts," *Transportation Research*, Vol. 1; 365-373, 1980.
9. Roebuck, J. A. *Engineering anthropometry methods*, John Wiley & Sons, New York, 1975.