



## 안정판 위에서의 직립자세기 평형유지 특성

### Human Workers' Stability-Maintaining Capabilities on A Tilttable Stability Platform

최재남\*·임현교\*\*

Jae-Nam Choi · Hyeon-Kyo Lim

(1996년 12월 31일 접수, 1997년 6월 10일 채택)

#### ABSTRACT

The number of accidents due to slipping, falling and awkward postures are estimated to account for over forty percent of annual industrial accidents in Korea. To prevent such accidents, stability-maintaining capabilities of workers should be understood before any other approach.

This research was aimed to analyze capabilities of the workers with the help of young male students maintaining standing postures on a tilttable stability platform.

The experimental result showed that tilting direction, height of pivoting point, and permissible degree of swaying made significant effects on stability-maintaining duration.

Besides, humans are more capable of maintaining their standing body postures on a platform tilttable fore and aft rather than on one tilttable sideways. The number of falling or tripping supported this phenomenon.

A mechanical and physical discussion on the stability was added.

#### 1. 서론

우리나라의 생산현장에는 생산자동화, 공장자동화 등 대량생산을 위한 갖가지 기술이 도입되고는 있으나, 현실적으로 발생하는 산업재해는 그 사고발생 유형이 아직도 원시적인 단계를 벗어나

지 못하고 있다.

일례로 1990년 발생한 산업재해 총 132,893건 중 추락 11,854건(8.9%), 전도 15,051건(11.3%), 무리한 동작 16,226건(12.2%)이 차지하는 비중은 32.4%, 1991년 발생한 산업재해 총 128,169건 중 추락 13,944건(10.9%), 전도 17,413건(13.6%),

\*충북대학교 대학원

\*\*충북대학교 안전공학과

무리한 동작 25,357건(19.8%)이 점유하는 비중은 44.3%에나 이르고 있다.

이러한 재해를 예방하기 위해서는 몇 가지 단순한 안전장치를 하는 것만으로도 기계 설비의 방호 조치는 끝나겠지만, 무엇보다도 중요한 것은 다양성과 변이성을 특징으로 하는 인간인 작업자의 특성을 제대로 파악하지 않고서는 효과적인 예방이 어렵다는 것은 누구나 짐작할 수 있다.

이제까지 인간공학적인 자세의 연구는 평탄한 면위에서 대칭적인 작업자세를 가지고 작업하는 작업자에게만 초점을 맞추어 진행되어 왔지만, 실제로 작업하는 현장에서는 그와 같은 이론적이고 이상적인 작업자세는 좀처럼 지켜지지 않고 있다.

더욱이 몇 단으로 쌓여진 적재창고에서 재료물과 작업부품을 쌓거나 끌어내리는 작업은, 안정된 사다리나 받침판을 이용하는 것이 아니라, 적재단(積載壇) 위에 양발을 적당히 걸쳐 딛고 선 상태에서 대상을 밀거나 당기고 또는 들어내리거나 올리는 형태로 이루어지고 있는 실정이다. 이와 같이 불안정한 자세에서의 작업수행은 자칫 균형을 잃는 경우 추락에 의한 2차, 3차 재해를 초래하기 쉽다. 이러한 까닭에 작업의 수행이라는 원래의 목적보다는 오히려 자세의 안정성을 유지하는 것이 당면한 최대의 관건이 될 수도 있다.

인간의 자세유지 능력중 가장 단순한 형태는 평형유지이다. 물리적으로 말할 때 평형(balance)이란, 한 점 주위에 힘이 작용할 때 그들간에 과부족이 없으므로 인해 그 한 점이 정지되어 있는 상태를 말한다<sup>4)</sup>. 따라서 작용하는 힘들 중에서 한 힘이 지나치게 크거나 작거나 하면 평형은 상실된다.

이것을 인체의 자세유지라는 점에서 바꿔 말한다면, 인체의 무게중심을 지나는 수직방향의 가상선(line of gravity)이 신체를 지지하는 지지면을 벗어나는 경우 인간은 자세의 평형을 상실하고 쓰러지게 된다는 의미이다.

이런 점에서 인간의 직립자세는 평형의 가장 좋은 예이다. 관절을 둘러싼 근육(筋群)이 적절한 긴장을 유지함으로써 길항근(拮抗筋; antagonistic muscle) 간에 평형이 유지되어, 신체가 일정범위 내에서만 동요가 이루어져 결과적으로 직립상태를 유지하는 것이다. 이 때 긴장의 조절은 의식적인 지배보다도 무의식적인 조절에 의한 것이다<sup>8)</sup>.

그러므로 만약 작업자가 현장에서 평형유지에 실패하는 경우, 그것은 얼마든지 추락과 전도로 이어질 수 있어, 앞에서 밝힌 바와 같이 연간 산업 재해의 높은 점유율을 나타내는 것이다. 그럼에도 불구하고 여전히 추락과 전도, 그리고 무리한 자세나 동작이 문제로 거론되는 이유는 아직까지도 작업자의 자세유지 능력과 근력발휘에 대해 별로 연구 보고된 바가 없기 때문이다.

따라서 본 연구는 작업자들의 자세유지 능력이 어떤 특성을 갖는가를 파악하기 위하여, 전후 혹은 좌우방향으로 기울어질 수 있는 안정판(stability platform) 위에 올라섰을 경우 작업자의 평형유지시간과 전도 횟수는 어떻게 변화하는가에 초점을 맞추어 연구하였다.

## 2. 실험방법

실험은 pivot 축으로 지지되는 안정판 위에 올라 선 피실험자에 대해, 전후나 좌우 어느 방향으로 기울어지지 않고 허용된 동요각도내에서 직립자세를 유지하는 시간간격을 측정하였다.

실험에서 사용된 기기와 주요 기능은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental Equipments and Specifications

| Experimental Devices | Model & Specification   |
|----------------------|---|
| -Stability platform  | Lafayette, Model 16020 1unit<br>dimension 32½"×36",<br>with increment<br>(7½", 9", 10½", 12"height) |
| -Data recorder       | Lafayette, Model 58004 1unit  |
| -Repeat cycle timer  | Lafayette, Model 51012 1unit  |
| -Clock/counter       | Lafayette, Model 54035 3units   |

안정판(stability platform)은 허용 동요각도를 조정할 수 있으며 그 표면이 사포(砂布; sand paper)처럼 표면처리 되어있어, 마찰계수는 1에 가깝다고 판단되어<sup>3)</sup>, 실험도중 미끄럼으로 인한 균형상실의 우려는 없었다.

Repeat cycle timer는 실험지속시간중 어느 시점에서의 관측치를 취할 것인가를 결정하는데, 본 실험에서는 20초 간격을 두고 각 20초씩의 관측자료를 취하였다.

Clock counter는 주어진 조건에 해당되는 시간,

즉 좌측으로 기울어진 시간, 우측으로 기울어진 시간, 또 평형을 유지한 시간을 계측한다. 따라서 표에서 보는 바와 같이 3개의 기기가 사용되었다. 한편 data recorder는 세 가지 경우에 대해 각각의 계측횟수를 기록하는 기능을 한다.

실험은 경사가능방향을 전후, 좌우의 두 가지로 구분하고, 평형유지라고 판단하는 platform의 허용동요각도(5, 10, 15°)와 pivot 축의 높이(7½, 9, 10½, 12")를 변화시켜 그 반응결과를 측정하였다.

본 실험에는 20대 전후의 남자 대학생 22명(평균 연령 24.27±1.39세, 평균신장 170.77±4.53cm, 평균체중 60.82±3.57Kg)이 참여하여 각각의 실험 조건에 대해 각각 10회씩 반복 실험하였는데, 물론 학습효과(learning effect)를 최소화하기 위하여 무작위 순서로 실험을 수행하였다. 피실험자들에 대해서는 실험수행전 일련의 협동동작과 반응검사 등을 통해 신체기능이 정상임을 확인하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

실험결과를 정리한 것이 Fig. 1과 Fig. 2이다. 이 그림에 의하면 실험조건에 관계없이 발의 위치가 전후방향인 자세보다는 좌우방향인 자세에서의 평균 균형유지 시간이 더 길고 반면 편차는 작다는 사실을 일관성있게 보여준다.

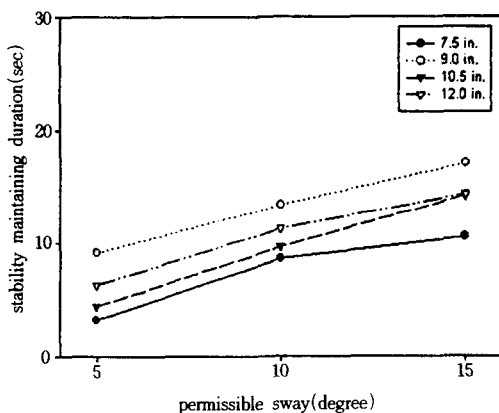


Fig. 1 Stability-Maintaining Duration over Permissible Sway (fore/aft)

이 때 평형유지시간에 영향을 미치는 요인들의 효과에 대해 분산분석한 결과는 Table 2와 같다.

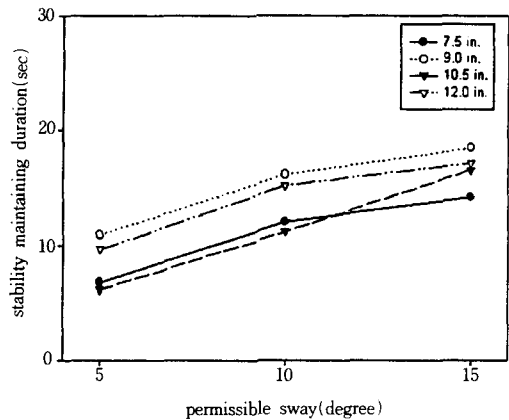


Fig. 2 Stability-Maintaining Duration over Permissible Sway (left/right)

이 표에 따르면 평형유지시간은 발판의 경사가능방향, pivot축의 높이, 허용 동요각도 등에 따라 유의한 차이가 있다는 것을 알 수 있다(p<0.01). 또 발판의 경사가능방향과 pivot축 높이, 허용동요각도와 pivot축 높이의 교호작용 효과도 평형유지 시간에 유의한 영향을 주고 있음을 알 수 있다(p<0.01).

Table 2 ANOVA on Stability-Maintaining Duration

(\*significant, p<0.01)

| variable                | SS        | df   | MS       | F        | Signif. |
|-------------------------|-----------|------|----------|----------|---------|
| Main effect             |           |      |          |          |         |
| direction               | 2576.676  | 1    | 2576.676 | 165.972* | .000    |
| height                  | 5478.940  | 3    | 1826.313 | 117.639* | .000    |
| degree                  | 16843.352 | 2    | 8421.676 | 542.468* | .000    |
| 2-way interactions      |           |      |          |          |         |
| direction×height        | 271.655   | 3    | 72.552   | 4.673*   | .003    |
| direction×degree        | 13.271    | 2    | 6.636    | .427     | .652    |
| height×degree           | 315.850   | 6    | 52.642   | 3.391*   | .002    |
| 3-way interactions      |           |      |          |          |         |
| direction×height×degree | 51.406    | 6    | 8.568    | .552     | .769    |
| Residual                | 27028.587 | 1741 | 15.525   |          |         |
| Total                   | 55245.321 | 1764 | 31.318   |          |         |

Fig. 3에 의하면 pivot축의 높이가 높아짐에 따라 평형유지시간은 점차 증가하는 경향을 나타내는데, 이것은 허용 동요각도의 변화와 함께 안정판의 허용동요폭을 크게 하는 효과를 가져오기 때문이다.

이것은 Fig. 4를 통해 다음과 같이 설명될 수 있다. 그림과 같은 조건의 안정판 위에 올라선 인간

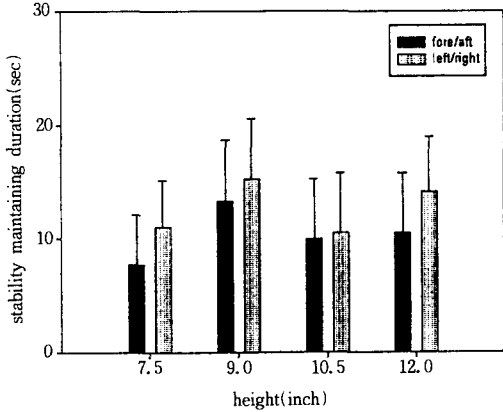


Fig. 3 Variation of Stability-Maintaining duration over Pivot Height

이 평형을 유지하기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$W \cdot x \leq w \cdot h \cdot \sin \theta$$

O : pivot축

a : 인체의 무게중심(x, y)

b : 안정판의 무게중심

h : 안정판으로부터 pivot축까지의 높이 (즉, O에서 b까지의 거리)

W : 인체의 체중

w : 안정판의 무게

$\theta$  : 허용동요각도

따라서 인체의 무게중심이 좌우 혹은 전후로 이동할 수 있는 범위 x는

$$x \leq (w/W) \cdot h \cdot \sin \theta = \text{상수(constant)}$$

를 만족하여야 한다. 결국 실험조건이 정해지면, 피실험자의 체중에 따라 무게중심이 이동할 수 있는 폭은 물리적인 실험조건에 따라 사전에 결정된다는 것을 의미한다.

이 값을 도표로 정리하면 Table 3과 같다. 보는 바와 같이 허용동요각도가 증가함에 따라, 또 pivot축의 높이가 증가함에 따라 무게중심의 허용동요폭이 증가하므로, 평형유지 시간이 증가한다는 것은 당연한 현상이다.

그러나 평형유지시간의 증가가 이 상수들에 비례하는 수치가 아니고, 수직으로부터의 각도변이에 따라 급격히 감소함은 Fig. 1로부터 쉽게 파악할 수 있다.

결과적으로 평형으로부터 벗어나는 평형유지실패 현상도 다른 물적이거나 수학적 현상과 마

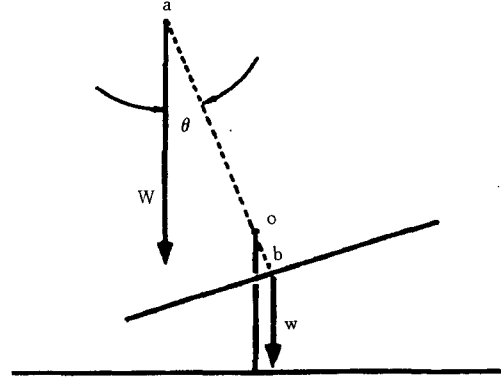


Fig. 4 Stability-Maintaining Conditions of Standing Posture on a Tilttable Platform

Table 3 Permissible Ranges of Sway

(w : platform weight, W : body weight)

| pivot height | permissible sway |             |             |
|--------------|------------------|-------------|-------------|
|              | 5°               | 10°         | 15°         |
| 7½"          | 0.6537(w/W)      | 1.3024(w/W) | 1.9411(w/W) |
| 9"           | 0.7844(w/W)      | 1.5628(w/W) | 2.3294(w/W) |
| 10½"         | 0.9151(w/W)      | 1.8233(w/W) | 2.7176(w/W) |
| 12"          | 1.0459(w/W)      | 2.0838(w/W) | 3.1058(w/W) |

찬가지로 오차가 작을수록 발생확률이 높고, 오차가 클수록 발생확률이 작다<sup>9)</sup>는 일반론을 따른다고 할 수 있다.

Fig. 5에 보는 바와 같이 허용 동요각도가 증가함에 따라 평형유지시간은 길어지고 편차는 작아지는 현상은 이상과 같은 사실을 뒷받침한다.

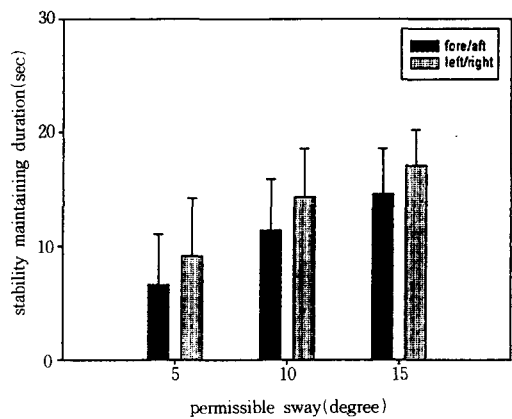


Fig. 5 Variation of Stability-Maintaining Duration over Permissible Sway

그런데, 일반적으로 직립자세에서 평형을 유지하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 사항들이 검토될 수 있다.

우선적으로, 평형을 쉽게 유지하기 위해서는 platform과의 접촉면이 넓어야 한다<sup>5,7)</sup>. 역학적 이론에 따르면 물체가 평형(equilibrium)상태에 있다는 것과 안정(stable)하다는 것은 다음 조건을 의미한다.

$$\text{평형(equilibrium)} \quad \frac{dV}{dx} = 0$$

$$\text{안정(stable)} \quad \frac{d^2V}{dx^2} > 0$$

즉, 평형이란 물체의 위치에너지 V가 변화하지 않는다는 의미이고, 안정상태란 위치에너지의 도함수 dV/dx의 변화율이 변화하지 않는다는 의미이다<sup>4)</sup>. 이 때 변수 x는 물체의 변위(displacement)를 나타낸다.

물론 인간이 안정판 위에서 있을 때에는 자세의 흐트러짐으로 말미암은 무게중심의 동요가 외력(external forces)으로 작용한다. 이 때 안정하기 위해서는 힘을 받는 방향에 대해 지지면적이 넓어야 하는데, 결과적으로 직립자세로 서 있는 사람은 전후방으로부터 힘을 받았을 때보다도 좌우로부터 힘을 받았을 때가 평형을 유지하기가 더 쉽다. 그 이유는 좌우방향으로 발을 위치시켰을 때의 지지면적이 전후방향으로 위치시켰을 때보다 넓기 때문이다<sup>7)</sup>.

두번째 조건으로는 물체의 무게중심이 낮아야 한다. Fig. 6에서와 같이 수평면상에서 직립자세를 유지하기 위해서는 다음과 같은 조건이 충족되어야 한다.

$$F < W \times \frac{bc}{ab}$$

a : 무게중심

b : 무게중심의 수평면상의 투사점

c : 지지면의 끝

F : 외력

W : 체중

다시 말해 ab에 비해 bc가 클수록 안정하다는 의미인데, 결과적으로 같은 보폭으로 벌리고 섰을 경우 키가 큰 사람에 비해 키가 작은 사람이 더 안정감이 있어 평형을 유지하기가 쉽다는 뜻이다.

그러나 어떠한 조건에서도 전후방향의 자세보다

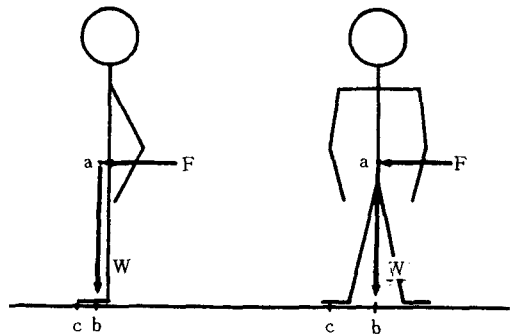


Fig. 6 Equilibrium Conditions of Standing Erect Posture on the Ground

는 좌우방향의 자세가 더 안정적이라는 현상은 주목할 만한 일이다.

인간의 직립자세와 네 발 달린 짐승의 기립자세는 매우 유사하다고 한다. 개의 경우 좌우측발의 사이에서는 무게중심의 이동에 의한 변동이 보이지 않는데, 인간의 경우에도 의식적으로 체중을 이동시키지 않는 한 변동이 없다는 것이다. 또 개에서는 우측 혹은 좌측에 있어서 앞뒷발 사이에는 중량이동에 의한 변동이 보이는 반면, 인간에게는 앞뒷발사이가 아니라 발가락끝 부분과 발뒷꿈치 부분 사이에 중량이동에 의한 변동이 보인다는 사실이다<sup>6)</sup>.

이것은 인간의 경우 앞뒷발 사이의 중량이동이 없어진 대신, 직립훈련에 의해 새로이 뒷발의 발뒷꿈치 부분과 발가락끝 부분 사이에 중량이동이 이루어질 수 있게 되어 직립이 가능해졌다는 사실로 설명될 수 있다.

따라서 직립보행 훈련이 인간으로 하여금 전후방향의 무게중심의 이동을 더욱 수월하게 만들었으며 특히 그 현상은 발앞꿈치 부분과 발뒷꿈치 부분사이에서 일어나게 되었는데, 오히려 이 기능이 자세의 안정성을 저해하는 요인으로 작용하고 있는 셈이다.

결국 좌우방향의 평형유지시간이 긴 데 비하여 전후방향의 평형유지 시간이 일관성있게 짧은 것은, 직립보행으로 인한 전후방향의 기울어짐에 대한 높은 허용성 때문이라고 추정된다.

이러한 현상은 Table 4에서도 확인할 수 있다. 이 표는 각각의 실험조건에서 전후방향 혹은 좌우방향의 어느 쪽으로 몇 차례 기울어졌는가를 집계한 것인데, 보는 바와 같이 전후방향보다는 좌우

방향의 넘어진 횟수가 적어 더 안정성이 높은 것을 나타낸다. 또 앞에서 이미 설명한 바와 같이 허용 동요각도가 증가할수록, pivot축의 높이가 높을수록 평형유지 실패횟수가 감소하는 현상을 확인할 수 있었다.

Table 4 Variation of Number of Fallings

| tilting direction<br>pivot height |              | (fore \ aft or left \ right) |             |             |             |  |  |
|-----------------------------------|--------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|--|--|
|                                   |              | permissible sway             |             |             | mean        |  |  |
|                                   |              | 5°                           | 10°         | 15°         |             |  |  |
| 7½"                               | fore \ aft   | 7.33 \ 5.79                  | 5.59 \ 4.82 | 5.73 \ 3.85 | 6.26 \ 4.82 |  |  |
|                                   | left \ right | 6.81 \ 7.08                  | 4.13 \ 4.62 | 3.83 \ 3.92 | 4.92 \ 5.21 |  |  |
| 9"                                | fore \ aft   | 5.26 \ 4.65                  | 3.72 \ 3.42 | 2.13 \ 2.09 | 3.70 \ 3.39 |  |  |
|                                   | left \ right | 4.54 \ 4.47                  | 2.53 \ 2.54 | 0.99 \ 1.44 | 2.69 \ 2.82 |  |  |
| 10½"                              | fore \ aft   | 7.02 \ 6.44                  | 5.73 \ 4.61 | 4.95 \ 4.08 | 5.80 \ 4.94 |  |  |
|                                   | left \ right | 6.67 \ 6.77                  | 4.63 \ 4.55 | 3.26 \ 3.37 | 5.12 \ 5.15 |  |  |
| 12"                               | fore \ aft   | 6.87 \ 5.82                  | 4.37 \ 3.75 | 2.76 \ 2.23 | 4.67 \ 3.93 |  |  |
|                                   | left \ right | 6.37 \ 5.23                  | 4.37 \ 3.75 | 1.61 \ 1.83 | 3.72 \ 3.52 |  |  |
| mean                              | fore \ aft   | 6.43 \ 5.52                  | 4.54 \ 3.93 | 3.47 \ 2.82 | 4.79 \ 4.07 |  |  |
|                                   | left \ right | 5.87 \ 5.52                  | 3.35 \ 3.53 | 1.93 \ 2.20 | 3.76 \ 3.79 |  |  |

흥미있는 사실은 전후방향의 경우에는 전방향으로 기울어진 횟수가 월등히 많은 반면, 좌우방향의 경우에는 뚜렷한 차이가 없는 점으로, 이 역시 직립보행시 무게중심을 앞으로 이동시키는 것에 지나치게 민감한 때문으로 추정된다.

이상의 분석을 종합하면, 신체의 균형을 유지하며 물건을 든다든가 밀고 당기는 작업을 해야 하는 경우, 발을 좌우방향으로 위치시키는 자세가 전후방향으로 위치시키는 자세에 비해 더 안정적이라고 결론지을 수 있다.

다만 이 때 인간이 측면을 향해 밀거나 당길 수 있는 힘은, 신체의 앞면에서 발휘할 수 있는 힘에 비해 상대적으로 작다는 점은 작업을 지도하는 관리감독자가 반드시 명심하여야 할 사항이다.

특히 물건을 들어올리는 작업은 척추가 뒤틀린 자세에서 작업이 수행된다는 점에서 그 중량물의 무게의 경중(輕重)에 관계없이 매우 위험한 작업으로<sup>1)</sup>, 요통상해를 예방한다는 측면에서 반드시 피해야 할 작업자세이다<sup>2)</sup>.

이같은 가정은, 실험도중 피실험자들이 발-특히 발의 위치가 전후방향일 때 뒤에 놓인 발-의 방향을 무의식적으로 조정하여, 무게중심의 동요 방향을 전후방향으로부터 좌우방향으로 변화시킴으로써 자세의 안정성을 도모하려 했던 점에 대해서도 부분적인 설명을 가능하게 해 준다.

## 4. 결 론

이상의 실험을 통하여, 좌우 혹은 전후 방향으로 기울어 질 수 있는 안정판위에서 평형을 유지하는 경우에는 특히 다음과 같은 현상을 발견할 수 있었다.

첫째, 안정판이 전후로 기울어 질 수 있는 경우보다는 좌우로 기울어 질 수 있는 경우에 평형유지 시간이 더 긴 것으로 추정되었다. 또 평형에 실패하여 한쪽방향으로 쓰러진 실패횟수는 전후로 기울어질 수 있는 경우에 더 많아 이와 같은 사실을 뒷받침하였다.

둘째, 안정판이 기울어지는 방향에 관계없이 pivot축의 높이가 낮을수록, 허용 동요각도가 증가할수록 평형유지 시간은 증가하였으며, 동시에 표준편차도 감소하였다.

결과적으로 정적(static)인 자세에서 평형을 유지하기 위해서는 가급적 발을 넓게 벌려 지지면을 넓게 하고, 무게중심을 낮추는 것이 바람직하지만, 안정판과 같이 지지면이 불안정한 경우에는 발을 좌우로 벌려 자세의 안정을 도모하는 것이 더욱 안전하다고 판단되었다.

그러므로 이상과 같은 사항을 종합한다면 서두에서 밝힌 바와 같이 불가피하게 적재단위에 적당히 발을 딛고 올라서서 작업해야 하는 경우, 발을 좌우로 벌려 딛고, 물체가동이나 중량물운반을 신체의 좌우방향으로 이동시키는 것이 신체의 균형을 유지하는데 도움이 된다는 것을 주지시키는 것도 노동재해 예방의 한 방법이다.

단, 무거운 물건을 들거나 큰 힘으로 작업물을 밀거나 당겨야 하는 경우에는 척추가 뒤틀린 상태에서 작업을 하게 되어, 평형유지의 실패로 인한 추락이나 낙하라는 측면과는 달리 요통상해(low back injuries)라는 또 다른 형태의 심각한 상해를 유발할 가능성이 있으므로 주의를 요한다.

## 참 고 문 헌

- 1) Buckle, P. W., Stubbs, D. A., Randle, P. M., and Nicholson, A. S., "Limitation in the application of materials handling guidelines", *Ergonomics*, Vol. 35, No. 9, pp. 955~964, 1992.

- 2) Chaffin, D. B., and Baker, W. H., A Biomechanical Model for Analysis of Symmetric Sagittal Plane Lifting, AIEE Transactions, Vol. 2, No. 1, pp. 16~27, 1970.
- 3) Kroemer, K. H. E., "Horizontal push and pull forces", Applied Ergonomics, Vol. 5, No. 2, pp. 94~102, 1974.
- 4) Meriam, J. L., and Kraige, L. G., Engineering Mechanics Volume 1: Statics, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- 5) Simonian, C., Fundamentals of Sports Biomechanics, Prentice-Hall, Inc., 1981.
- 6) 大島正光, ヒト-その未知へのアプローチ, 同文書院, 1982.
- 7) 大島正光, 作業面および作業姿勢, 労働安全衛生ハンドブック, 河出書房, 1952.
- 8) 人間工学ハンドブック編纂委員会, 人間工学ハンドブック 増補 第2版, 金原出版株式会社, 1966.
- 9) 破壊事故とヒューマンエラー, 小倉信和, 安全工学, Vol. 24, No. 4, pp. 186~191, 1985.