

## 수직 이송계의 최적 설계에 관한 연구

이석우\*, 최헌종, 황보승욱, 김대중 (한국생산기술연구원)

### A Study on Optimal Design of Perpendicular Guideway Mechanism

S. W. Lee, H. Z. Choi, S. W. Hwangbo, D. J. Kim (Korea Institute of Industrial Technology)

#### ABSTRACT

Perpendicular guideway mechanism has a different behavior with horizontal guideway mechanism due to the slider weight. So, to decrease its weight effect, counter balances such as weight type and hydraulic cylinder type are used. But it can also make another motion behavior by weight rate of slider and counter balance, its connected position. Therefore, it is necessary to find design parameters and analyze their effect.

This paper dealt with the optimal design of perpendicular guideway mechanism. For analysis, the theoretic model as same as real machine tool and gib plate to adjust the clearance was used. Rotational angle and displacement of slider, pressure distribution, friction distribution were calculated. Stick slip, intermittent motion of slider according to friction change was adapted to the perpendicular guideway mechanism.

**Key Words :** Perpendicular Guideway Mechanism(수직이송계), Guideway(안내면), slider(슬라이더)  
Optimal Design(최적설계), Gib Plate(기브 플레이트), Clearance(간극량), Stick-Slip(스틱슬립)

#### 1. 서론

수직 이송계는 수평 이송계와는 달리 상·하 이송 시 이송 방향 또는 반대 방향으로 슬라이더의 무게가 작용한다. 슬라이더의 무게가 클수록 구동 모터의 부하가 증가하며, 정전 시 슬라이더의 현재 위치를 유지하기가 어려워 슬라이더의 낙하로 인한 공구파손 등이 발생하기 쉽다. 이러한 슬라이더의 무게에 의한 현상을 줄이기 위하여 체인, 로프 등을 이용한 무게식 카운터 밸런스(Weight Counter-Balance)나 유압을 이용한 유압실린더 카운터 밸런스(Oil Cylinder Counter-Balance)를 컬럼의 전면이나 후면에 설치한다. 그러나 실제 시스템에서는 카운터 밸런스의 영향으로 상·하 이송 시 다른 운동특성을 나타낸다. 즉, 슬라이더의 무게와 무게 중심점의 위치, 이송 방향 등에 따라 안내면에 작용하는 굽힘 모멘트가 달라지는 것이다<sup>(1)</sup>.

슬라이더와 카운터 밸런스의 하중 비 및 슬라이더에 카운터 밸런스를 체결하는 위치 등은 수직 이송계를 구성하는 볼 스크류나 안내 면 등에 영향을 미치기 때문에 수직 이송계의 운동 특성을 결정하

는 중요한 영향인자가 된다.

본 연구에서는 실험을 통하여 제시된 설계 변수들을 이용하여 실제 공작기계와 역학적으로 등가인 이론모델을 통해 수직 이송계의 메커니즘을 해석하고 이송 시 발생하는 운동특성에 따른 오차해석과 설계 시 필요한 기준 등을 정립하고자 한다.

이를 위해 수직 이송계에 작용하는 힘, 모멘트 성분의 분석을 통해 X, Y, Z 축에 대한 슬라이더(Slider)의 자세거동을 나타내는 회전각  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  와 안내면에 대한 변위  $\delta$  를 구해서 설계인자에 따른 슬라이더의 자세거동을 해석하였다. 또한 안내면 A, B, C 면에서의 압력분포와 마찰력분포를 통해 Clearance 조정을 위한 적절한 Gib Plate의 예압량을 결정할 수 있도록 하였으며 Stick Slip 현상을 터가이드 Type 수직 이송계 모델에 적용해 수직 이송계에서 마찰력 변화로 인한 슬라이더의 불연속적인 운동특성을 해석하고자 한다.

결론적으로 본 논문에서는 상기의 기능을 갖는 수직 이송계의 최적 설계 프로그램을 개발하여 수직 이송계의 설계 시 편리하게 사용할 수 있도록 하고자 하였다.

## 2. 수직 이송계의 이론적 해석

$$\delta 1 = \alpha l_d - \beta x, \quad \delta 2 = \alpha l_d - \gamma x$$

### 2.1 수직 이송계의 모델링

수직 이송계 시스템은 슬라이더, 안내면, 카운터 밸런스 및 Gib Plate 등으로 구성되어 있으며, Fig. 1 은 수직 이송계의 설계인자 파악과 그 영향정도를 분석하기 위한 이론 모델을 나타낸 것이다. 슬라이더는 상·하 이송 시 A, B, C 3 개의 안내면을 따라서 직선운동을 하며 카운터 밸런스는 슬라이더의 무게에 의한 영향을 줄이기 위해 하중과 반대방향으로 작용하게 한다. Gib Plate 는 Clearance 조정을 위해 C 면 안쪽 슬라이더와 안내면 사이에 1 개를 설치하여 예압을 조정할 수 있도록 하였다. 슬라이더의 운동특성을 결정짓는 주요 설계 변수는 슬라이더의 길이  $l$ , 안내면사이의 거리  $l_a$ , 좌표축에서 구동력까지 거리  $l_b$  그리고 슬라이더와 카운터 밸런스의 하중 비 및 카운터 밸런스의 작용위치 등이다.

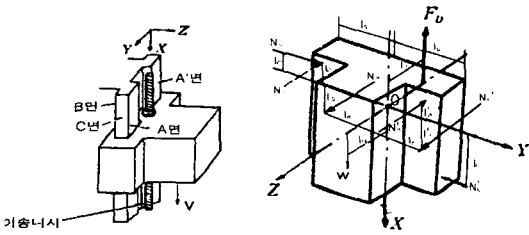


Fig. 1 수직 이송계의 운동특성 해석을 위한 모델

### 2.2 수직 이송계의 자세거동 해석

수직 이송계의 운동 특성을 해석하기 위해 수직 이송계 시스템을 이루는 요소들을 강체로 가정한다. 이송계에 작용하는 힘은 슬라이더의 자중, 카운터 밸런스의 무게, 볼 스크류에 의한 구동력, Gib Plate 예압 그리고 안내 면에서의 면 하중과 마찰력 등이다. 이러한 힘들에 의한 모멘트가 슬라이더를 각 좌표 축에 대해 회전시켜 일정한 변위를 가지게 한다. 아래 식은 힘 평형 방정식을 이용하여 슬라이더의 회전각과 변위를 나타낸 식이다<sup>(2)</sup>.

$$\alpha = \frac{0.19}{l_d} \left[ \frac{(l_d - \frac{l_a}{2})(N_A - N_A') - (l_d - \frac{l_b}{2})(N_B - N_B')}{2l_a(2l_d - l_a)} \right]^{0.46}$$

$$\beta = \frac{0.19}{l} \left[ \frac{l_G W - l_D F_D - l_G W_{CB} \pm \frac{l_c}{2} [\mu_A(N_A + N_A') - \mu_B(N_B + N_B')]}{2l^2 l_a} \right]^{0.46}$$

$$\gamma = \frac{0.19}{l} \left[ \frac{l_G W - l_G W_{CB} \pm \left[ \mu_A(l_d - \frac{l_a}{2})(N_A - N_A') + \mu_B(l_d - \frac{l_b}{2})(N_B - N_B') + \mu_C l_d (N_C - N_C') - 2\mu_C P l_o (l_d - l_a) \right]}{2l^2 l_a} \right]^{0.46}$$

### 2.3 면압 및 마찰력 분포 해석

면압과 마찰력은 Gib Plate 의 예압에 의해 발생하는데, 일반적으로 예압을 크게 하면 Clearance 가 향상되고 설계 허용범위 내의 변화량을 유지하면서 수직 이송계가 상·하 이송을 하지만 예압이 어느 범위 이상이 되면 Clearance 는 더 이상 향상되지 않으면서 오히려 각 면에서의 면압과 마찰력만 증가하는 현상이 발생한다<sup>(3)</sup>. 이것은 그만큼 수직 이송계를 구동 시키는데 많은 동력이 필요하다는 것을 의미하므로, Clearance 조정과 적절한 예압을 함께 고려하는 것이 최적화 설계에 있어서 중요하다.

### 2.4 스틱 슬립(Stick Slip) 해석

스틱 슬립을 해석하기 위해 수직 이송계를 Fig. 2 와 같은 1 자유도 운동기구로 나타내었다. 이 시스템에서 속도  $v$  로 슬라이더를 이송 시키면 구동 스프링 Force 가 정 마찰력과 같아 질 때까지 슬라이더는 움직이지 않고 구동스프링 Force 만 증가한다. 그리고, 구동 스프링 Force 가 정 마찰력보다 커지는 순간은 슬라이더가 움직이게 된다. 슬라이더가 움직이는 동안 구동 스프링 Force 는 상대적으로 줄어들어 작아지게 되어 슬라이더가 다시 정지하게 된다. 이 같은 현상을 반복하며 일어나는 것을 스틱 슬립이라 하며 슬라이더와 구동점 R 간의 상대 변위를  $x$  로 하여 운동방정식을 세우면 다음과 같다<sup>(4)</sup>.

$$\text{Slip 시} \quad (W/G)\ddot{x} + kx = W + \mu_d N \quad (v < 0 \text{ 일 경우})$$

$$(W/G)\ddot{x} + kx = W - \mu_d N \quad (v > 0 \text{ 일 경우})$$

$$\text{Stick 시} \quad \dot{x} = V$$

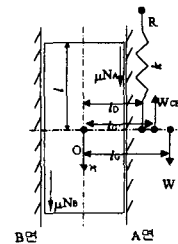


Fig. 2 스틱 슬립 해석을 위한 1 자유도 모델

### 2.5 이론적 해석 결과

이론적 해석 결과를 Fig. 3 과 4 에 나타내었는데 롤링 각( $\alpha$ )은  $l_d$  가 클수록 감소하고, 피칭 각( $\beta$ )은 슬라이더 길이  $l$  과 구동력까지의 거리  $l_b$  가 클수록 감소하며, 요잉 각( $\gamma$ )은 슬라이더 길이  $l$  이 크고 슬

라이더 하중까지의 거리가 작을수록 감소함을 알 수 있었다. 또한, 요잉 각은 슬라이더와 카운터밸런스의 중량비가 1에 가까울수록 감소하였다.

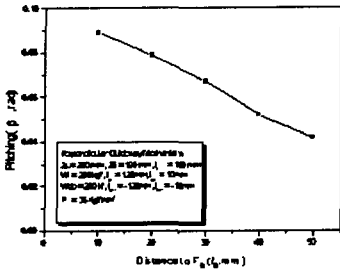


Fig. 3 구동력까지 거리에 따른 피칭 각 변화

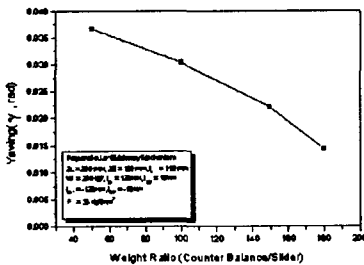


Fig. 4 슬라이더와 카운터 밸런스의 중량 비에 따른 요잉 각의 변화

### 3. 수직 이송계 최적화 설계 프로그램

#### 3.1 프로그램의 구성

수직 이송계 시스템은 여러 가지 동적 특성들을 분석하여 설계되어야 하는데 설계 시 최종 목표는 슬라이더의 안정된 자세 거동이다. 즉, 주축과 공구를 설치하는 부분인 슬라이더가 상·하 이동 방향과 외부에서 작용하는 힘에 관계없이 최소의 각 변위와 변형량을 갖고 움직이도록 설계되어야 한다. 본 수직 이송계의 설계 프로그램은 아래와 같은 4가지의 계산 모드로 구성되어 있으며, 최적의 슬라이더 자세 거동을 얻을 수 있도록 이송 시스템을 구성하는 요소(설계변수)들을 설계할 수 있도록 하였다.

첫째는 슬라이더(Slider)의 자세거동 해석 모드이다. 수직 이송계가 상·하 방향으로 움직일 때 카운터 밸런스의 유·무와 위치 및 슬라이더의 무게 등을 입력 데이터로 하여 슬라이더의 각 변위와 변화량을 계산하는 모드이다.

둘째는 면압 분포와 마찰력 분포를 해석하는 모드이다. 계산되어진 결과인 안내면에 작용하는 면압과 마찰력을 분석함으로써 Gib Plate의 적절한 예압량과 최적의 간극량(Clearance)을 결정하는 것이

주 목적이다.

셋째는 스틱 슬립(Stick-Slip) 현상을 해석하는 모드이다. 스틱 슬립은 슬라이드가 저속으로 안내면을 따라 움직일 때 그 면에 작용하는 마찰력 때문에 발생을 하는데 가공 중에 스틱 슬립이 발생하면 가공면의 품질을 떨어뜨리는 원인이 된다.

넷째는 외력에 의한 슬라이더의 자세 변화를 해석하는 모드이다. 외력은 주로 가공 중에 가공 저항력에 의해 발생하는 것으로서 가공 저항력이 커지면 슬라이더의 자세 거동에 변화가 생기기 때문에 정확한 형상 가공이 어렵다. 그러므로 외력의 작용점 및 작용 위치에 따른 슬라이더의 자세 거동 해석도 중요한 설계 변수 중의 하나이다.

#### 3.2 설계 프로그램의 구성

Fig. 5는 직 이송계의 설계 프로그램의 흐름도(Flow Chart)를 나타낸 것이다. 먼저 프로그램을 시작하면 초기 화면에서 외력의 작용여부에 따라서 모델선정과 설계해석으로 구분하여 사용자가 선택하도록 하였다.

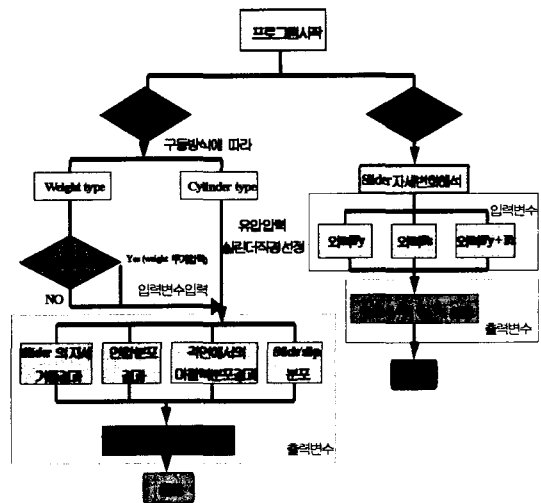


Fig. 5 수직 이송계 설계 프로그램의 흐름도

모델선정 모드는 입력 변수에 따른 슬라이더의 자세 거동, 각 면에서의 면압과 마찰력 분포 및 스틱 슬립을 해석하여 각축 방향의 각 변위와 슬라이더 변위량을 계산하는 모드이다. 만일 카운터 밸런스가 없다면 기본적인 설계 변수만 입력하면 되지만 카운터 밸런스가 있을 경우에는 카운터 밸런스의 종류, 무게 및 체결 위치 등의 설계 변수를 입력하여야만 한다.

설계해석 모드는 외력이 작용하는 방향에 따라 3가지로 구분하여 해석하도록 하였다. 즉, 외력이

X 축 또는 Y 축의 한 방향으로 작용하는 경우와 두 방향에서 동시에 복합적으로 작용하는 경우를 고려하였는데 한 방향으로 힘이 작용할 경우에는 한 점에만 작용하는 경우와 작용선과 수직 방향으로 이동을 하면서 외력이 작용하는 것도 계산이 되도록 하였다. 이 모드도 모델선정 모드와 같이 각축 방향으로의 각 변위와 슬라이더 변위량의 분포를 계산하는 모드이다. 이송계 설계를 위해 사용한 개발 툴은 마이크로소프트사의 Visual C++ 6.0 으로 그래픽 사용자 인터페이스(GUI) 환경으로 구축하였다.

### 3.3 해석 결과 화면

Fig. 6은 수직 이송계의 자세 거동을 해석하기 위한 설계 변수들을 입력하는 화면이다. 카운터 밸런스의 유·무를 라디오 버튼으로 선택할 수 있게 하였으며, 화면에 표시된 각각의 변수에 데이터를 입력하기 위해서 마우스로 클릭 하면 좌측 하단 부분의 그림이 변화하여 입력하고 있는 설계 변수의 정확한 의미를 파악할 수 있도록 하였다. 설계 데이터를 입력한 후 슬라이더 자세거동 버튼을 누르면 Fig. 7과 같이 슬라이더의 각 축에 대한 각 변위( $\alpha, \beta, \gamma$ )와 변형량( $\delta_1, \delta_2$ )이 계산된다. 또한 그래프 기능을 삽입하여 슬라이더 길이에 따른 결과 값들의 분포특성을 파악할 수 있도록 하였다.

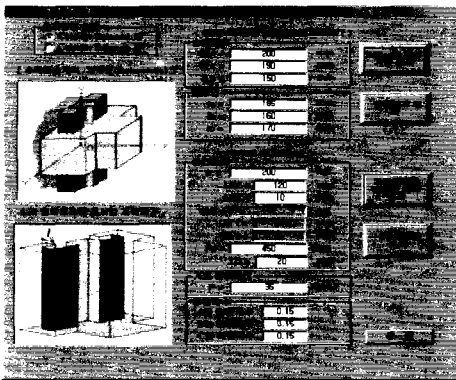


Fig. 6 설계변수 입력화면

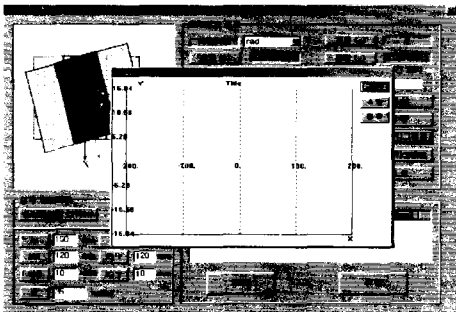


Fig. 7 슬라이더의 자세거동 해석결과

Fig. 8은 슬라이더와 가이드면 사이에 존재하는 면압 분포를 보여주는 화면이다. 해석 구간을 분할할 수 있도록 하여 원하는 분할 구간마다의 면압 분포를 볼 수 있도록 했다. Fig. 9는 터가이드 Type 수직 이송계에 저속 구동 시 마찰력에 의해 발생하는 스틱 슬립 현상을 해석한 결과 화면이다.

Fig. 10은 수직 이송계에 외력이 작용할 경우 슬라이더의 자세거동에 대해서 해석한 화면이다.

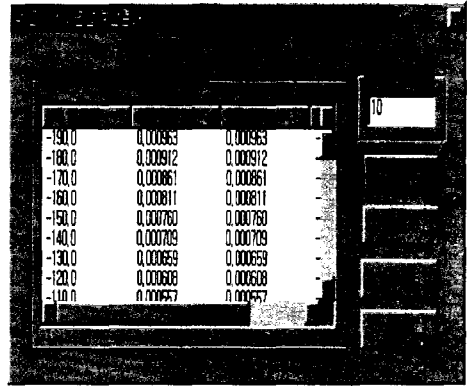


Fig. 8 면압 분포 해석 화면

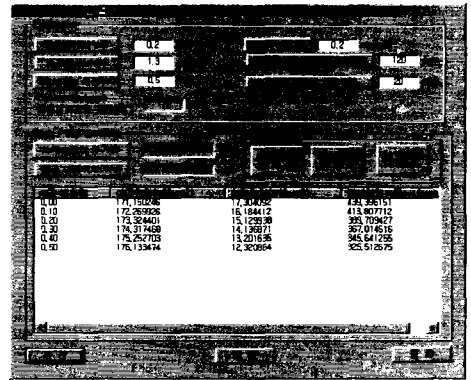


Fig. 9 스틱 슬립 해석 화면

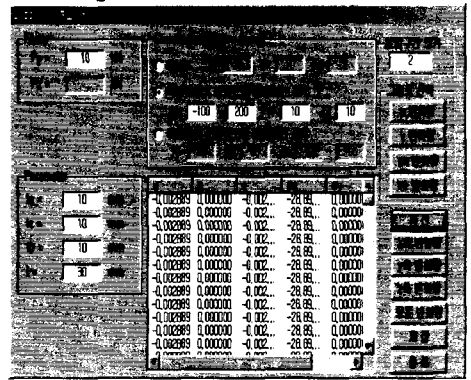


Fig. 10 외력에 의한 슬라이더의 자세거동 화면

#### 4. 결론

본 논문에서는 수직 이송계 설계 변수들이 슬라이더의 자세 거동에 미치는 영향을 분석하고 설계 기준을 제시하고자 하였다.

- (1) 수직 이송계를 모델링하여 운동특성을 해석하였다. 이론 해석의 신뢰성을 높이기 위하여 이론 식에 실험에서 얻은 실험 상수를 이용하였다.
- (2) 주요 설계인자는 슬라이더의 길이, 안내면 사이의 길이, 구동력까지의 거리 뿐만 아니라 슬라이더와 카운터 밸런스의 하중 비 및 작용위치와 Gib Plate 에 의한 예압량도 설계 시 고려 되어야 한다.
- (3) 수직 이송계 최적 설계 프로그램은 슬라이더의 자세 거동, 면압과 마찰력의 분포, 스틱 슬립 해석 및 외부 힘에 의한 슬라이더의 자세 거동 해석으로 나누어진다.
- (4) 최적 설계 프로그램은 설계 변수들이 슬라이더의 자세 거동 등에 미치는 영향 등을 쉽게 알 수 있게 함으로써 수직 이송계의 설계에 유용하게 사용할 수 있도록 하였다.

#### 후기

본 연구는 1998 년도 선도기술 개발사업의 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사합니다.

#### 참고문헌

1. 여인환, 박철우, 이상조, “NC 선반의 동적이송 오차에 관한 연구”, 춘계정밀공학회는문집, pp. 641-645, 1996.
2. 양문수, 유재홍, 이선규, “슬라이드 가이드의 고속 이송시 가공오차 해석”, 춘계정밀공학회는문집, pp. 1247-1251, 1998.
3. S. Kato, N. Sato, T. Matsubayashi, “Some Considerations on Characteristics of Static Friction of Machine Total Slideway”, Journal of Lubrication Technology, pp. 234-247, 1972.
4. S. Shiozaki, Y. Furukawa, K. Sakata, “An Analysis of Stick-Slip Vibration in a Vertical Slideway”, JSPE, Vol. 44, No. 8, pp 995-1001, 1978.