

LM가이드 상에서 건마찰 접촉을 하면서 운동하는 Cross Head의 사행동에 관한 연구

최영휴*, 정택수**, 조병호**, 김주한**, 최영준**

A Study on the Snake Motion of a Machine Tool Cross-Head Moving with Dry Friction on LM Guides

Young-Hyu Choi*, Taek-Soo Jung**, Byung-Ho Cho**,
Ju-Han Kim**, Young-Jun Choi**

Abstract

This paper reviews the concepts of the snake motion which can be often observed on the bodies moving along guide rails. A simple modelling is proposed in order to analyze the snake motion of the cross head assembly and force and moment equilibrium equations are established. It is determined the critical conditions at which snake motion just brings about. Some possible methods to reduce or prevent snake motion are discussed in detail.

에서 Y방향으로 이송시키도록 되어 있다. 이러한 이송운동 과정에서 헤드 어셈블리와 LM 가이드 사이에 마찰력에 의한 모멘트 불균형이 발생하여 헤드부가 사행동(蛇行動을) 일으키게 되며, 이로 인하여 마치 채터 진동시와 마찬가지로 구조물의 리어 패널과 사이드 패널 등에 심한 구조진동이 발생된다. 본 연구에서는 이러한 현상의 원인을 역학적으로 해석하고 사행동이 발생되는 조건과 사행동의 저감방안 등을 논의해 보고자 한다.

1. 서론

1.1 수직형 머시닝센터와 사행동 현상

Fig. 1은 수직형 머시닝 센터(M/C, Machining Center)의 개략도이다. 이 M/C의 헤드 어셈블리(Head assembly)의 작동 원리를 보면, 쓰리스트 모터(Thrust motor)를 구동시키면 볼 스크류(Ball screw)가 회전하면서 헤드 어셈블리를 LM 가이드 상

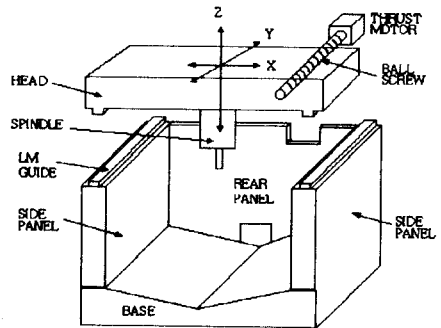


Fig. 1 Schematic of a Vertical M/C

1.2 왜 헤드 사행동이 생기는가?

가이드 웨이(Guide way)를 따라 마찰력과 이송력을 받으면서 이동하는 물체에

* 창원대학교 기계설계공학과

** (주)두산 기계BG 공작기계BU

어떻게 사행동이 발생되는가를 알아보기 위하여 헤드 어셈블리가 LM 가이드 상에서 Y축 방향으로 이송될 때의 작용력 모델을 아래 Fig. 2와 같이 제안한다.

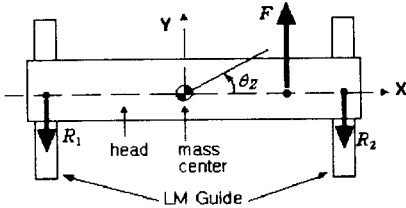


Fig. 2 A Simple Model of the Head Snake Motion

위 그림에서 헤드 어셈블리의 사행동은 이송력 F 와 그 반력 R_1, R_2 에 의하여 발생하는 Z축 방향의 모멘트 불균형에 의하여 발생하게 된다. 예를 들어 위 그림에서 무게중심 위치에서의 헤드 어셈블리에 걸리는 모멘트를 보면 F 와 R_1 에 의한 모멘트는 헤드 어셈블리를 왼쪽 즉, $+\theta_z$ 방향으로 회전시키려고 할 것이고, 이에 반해 R_2 에 의한 모멘트는 오른쪽 즉, $-\theta_z$ 방향으로 회전시키려고 할 것이다. 이들 두 모멘트의 크기가 다르면 모멘트 불균형이 발생하게 되고 헤드 어셈블리는 당연히 어느 한쪽 방향으로 회전하게 된다. 이러한 모멘트 불균형은 헤드 어셈블리의 무게중심 위치와 이송력의 작용점 위치에 따라서 달라지게 된다.

2. 헤드 사행동의 이론해석

2.1 단순 해석모델

헤드의 사행동을 역학적으로 해석하기 위하여 아래 Fig. 3과 같이 단순화 된 헤드 사행동 해석모델을 만들고, 작용력과 형상치수들을 그림에서와 같이 나타내기로 한다.

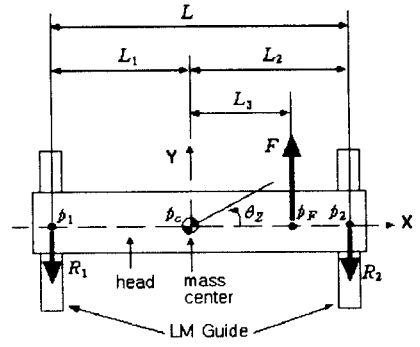


Fig. 3 Forces Acted on the Simple Model of Snake Motion

우선 해석의 단순화를 위하여 다음과 같은 가정을 하였다:

- (1) LM 가이드와 헤드 어셈블리와의 접촉은 점 접촉이다. 즉, 한 점에서만 접촉하며, 多占接觸, 線接觸 또는 面接觸이 아니다.
- (2) 고속 이송시의 동적인 힘(헤드 관성력 등)은 무시할 수 있다.
- (3) 헤드와 LM 가이드의 마찰계수는 일정하다.
- (4) 헤드 이송시의 STICK-SLIP MOTION은 무시할 수 있다.
- (5) 이송운동 중에 LM 가이드와 LM 가이드를 지지하고 있는 구조물의 진동현상은 미소하고, 따라서 일체의 구조물은 剛體라고 가정한다.

2.2 Y-축 방향 이송 조건식

이상과 같은 가정 하에서 Fig. 3의 모델에 대한 Y-축방향 힘의 평형식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\sum F_Y = F - (R_1 + R_2) = 0 \quad (1)$$

위 식에서, F 는 이송력이고, R_1, R_2 는 헤드와 LM 가이드사이의 마찰력이다. 그런데 식(1)이 평형이 되면, 이송력 F 와 마찰력의 합력, $(R_1 + R_2)$ 이 같게되므로 헤

드는 이송되지 않고 정지상태로 있게 된다. 즉, 이송력이 마찰력의 합력보다 커야 헤드의 이송이 가능하게 된다. 그러므로 헤드 어셈블리가 이송되기 위한 조건은 다음 식과 같이 된다.

$$F > (R_1 + R_2) \quad (2)$$

여기서 마찰력 R_1, R_2 는 다음 Fig. 4의 마찰력 해석 모델로부터 구할 수 있다.

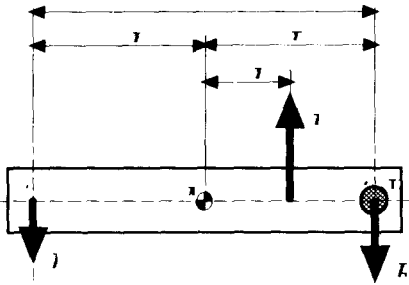


Fig. 4 Friction Force Analysis Model(Plane View)

위 Fig. 4에서 W_C 는 좌우측의 마찰력을 조절하기 위한 별도의 제어 중량(Control Weight)이고, M 은 헤드 어셈블리의 질량, g 는 중력상수이며, μ_1, μ_2 는 각각 좌·우측 LM 가이드의 마찰계수이다. Fig. 4의 해석 모델에서 좌·우측 마찰력 R_1, R_2 는 다음과 같이 구해지며, 그 방향은 항상 이송력 F 와 반대 방향이다.

$$\begin{aligned} R_1 &= \mu_1 \left(\frac{L_2}{L_1 + L_2} \right) Mg \\ &= \mu_1 \left(\frac{L_2}{L} \right) Mg \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} R_2 &= \mu_2 \left[\left(\frac{L_1}{L_1 + L_2} \right) Mg + W_C \right] \\ &= \mu_2 \left[\left(\frac{L_1}{L} \right) Mg + W_C \right] \end{aligned} \quad (3b)$$

2.3 Z-축 방향 모멘트 평형조건

헤드의 모멘트 평형은 헤드를 강체로

간주할 때 어느 지점을 기준으로 하든 만족되어야 한다. 여기서는 대표적인 두 가지 위치, 즉 헤드와 LM 가이드의 접촉점과 헤드 무게중심점에 대한 모멘트 평형조건을 검토해 보기로 한다.

2.2.1 접촉점에서의 모멘트 평형조건

예를 들어 Fig. 3의 해석 모델에서 헤드와 좌측 LM 가이드와의 접촉점 p_1 에 대한 Z-축 방향의 모멘트 평형식을 유도해 보면 다음과 같이 된다.

$$\sum M_{p_1} = (L_1 + L_3) \times F - L \times R_2 = 0 \quad (4)$$

위 식에 (4)식에서 구한 反力, R_1, R_2 를 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sum M_{p_1} &= (L_1 + L_3) \times F \\ &\quad - L \times \mu_2 \left[\left(\frac{L_1}{L} \right) Mg + W_C \right] \\ &= (L_1 + L_3) \times F \\ &\quad - \mu_2 (MgL_1 + W_C L) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 모멘트 평형이 이루어지지 않으면 당연히 헤드는 사행동을 일으키게 될 것이다. 그러므로 위 (5)식으로부터 이송력의 작용점이나 무게중심의 위치를 어떻게 적절히 조절함으로써 헤드의 사행동을 방지할 수 있는지 알 수 있다.

예를 들어 다음의 몇 가지 대표적인 경우를 고찰 해 보기로 하자.

1) 무게중심이 헤드의 중앙 위치인 경우

이 경우에는 헤드 어셈블리 자체의 무게중심은 $L_1 = L_2 = L/2$ 위치에 있고 별도의 제어질량, W_C 가 정확히 오른쪽 LM 가이드와 헤드와의 접촉점 상단에 부가된 경우이다. 그러므로 위 식(5)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sum M_{p_1} &= \left(\frac{L}{2} + L_3 \right) \times F \\ &\quad - \mu_2 L \left(\frac{Mg}{2} + W_C \right) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 모멘트 평형조건이 만족되기 위해서는 다음 조건이 만족되어야 한다.

$$\left(\frac{L}{2} + L_3\right) \times F = \mu_2 L \left(\frac{Mg}{2} + W_C\right) \quad (7)$$

즉, 위 조건 식으로부터 이송력의 작용점의 위치가 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} L_3 &= \frac{\mu_2 L}{F} \left(\frac{Mg}{2} + W_C\right) - \frac{L}{2} \quad (8) \\ &= \frac{L}{2} \left[\frac{\mu_2 (Mg + 2W_C)}{F} - 1 \right] \end{aligned}$$

위 (8)식을 보면 제어중량 W_C 를 부가함으로써 L_3 를 획기적으로 증가시킬 수 있다. 즉, 이것은 헤드 사행동을 일으키지 않도록 하면서도 이송력의 작용점 위치를 헤드 무게중심위치로부터 오른쪽 LM 가이드 쪽으로 치우치게 만들 수 있음을 의미한다. 이에 비하여 마찰계수를 증가시키는 것은 식 (3)에서 접촉마찰력 R_1, R_2 가 증가되고 따라서 식(2)의 조건으로부터 이송력 F 도 함께 증가되어야 하므로 결과적으로 L_3 를 증가시키는 효과가 미미하다.

2) 무게중심이 헤드의 중앙이 아닌 경우

이 경우는 헤드 어셈블리가 균일하게 설계·제작되지 않은 경우이다. 이 때에는 $L_1 \neq L_2 \neq L/2$ 이므로 모멘트 평형조건 식, (5)식으로부터 다음 관계가 성립한다.

$$(L_1 + L_3) \times F = \mu_2 (MgL_1 + W_C L) \quad (9)$$

따라서 이송력의 작용점 위치는 다음식으로부터 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_3 &= \frac{\mu_2}{F} (MgL_1 + W_C L) - L_1 \quad (10) \\ &= L_1 \left[\frac{\mu_2 (Mg + W_C L/L_1)}{F} - 1 \right] \end{aligned}$$

위 (10)식에서도 (8)식의 경우와 마찬가지로 제어 중량, W_C 를 부가함으로써 L_3 를

획기적으로 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 즉, 사행동 없이 이송력의 작용점을 헤드 무게중심위치로부터 오른쪽 LM 가이드 쪽으로 치우치게 만들 수 있다. 이에 비하여 마찰계수를 증가시키는 것은 식(3)과 식 (2)의 조건으로부터 이송력 F 도 함께 증가되어야 하므로 결과적으로 L_3 를 증가시키는 효과가 미미하다.

2.2.2 헤드 무게중심에서의 모멘트 평형

예를 들어 Fig. 3의 해석모델에서 헤드의 무게중심 위치에 대한 Z-축 방향의 모멘트 평형식을 유도해 보면 다음과 같이 된다.

$$\sum M_{b_c} = L_1 \times R_1 + L_3 \times F - L_2 \times R_2 = 0 \quad (11)$$

위 식에 식(3)에서 구한 反力, R_1, R_2 를 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sum M_{b_c} &= L_1 \times \mu_1 \left(\frac{L_2}{L}\right) Mg + L_3 \times F \\ &\quad - L_2 \times \mu_2 \left[\left(\frac{L_1}{L}\right) Mg + W_C\right] \quad (12) \\ &= L_3 \times F - \frac{L_1 L_2}{L} [(\mu_2 - \mu_1) Mg \\ &\quad + \frac{L}{L_1} \mu_2 W_C] = 0 \end{aligned}$$

위 식이 만족되지 않으면 당연히 헤드는 사행동을 일으키게 될 것이다. 그러므로 위 식(12)으로부터 이송력의 작용점이나 무게중심의 위치, 또는 마찰계수나 제어 중량을 어떻게 적절히 조절함으로써 헤드의 사행동을 방지할 수 있는지 알 수 있다.

예를 들어 다음의 몇 가지 대표적인 경우를 고찰해 보기로 하자.

1) 무게중심이 헤드의 중앙인 경우

이 경우에 $L_1 = L_2 = L/2$ 이므로 위 식(12)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sum M_{p_c} &= L_3 \times F - \frac{L_1 L_2}{L} \times \\ &\quad \left[\mu_2 (Mg + \frac{L}{L_1} W_C) - \mu_1 Mg \right] \\ &= L_3 \times F - \frac{L}{4} \times \\ &\quad \left[\mu_2 (Mg + 2W_C) - \mu_1 Mg \right] \quad (13) \\ &= L_3 \times F - \frac{L}{4} \times \\ &\quad \left[(\mu_2 - \mu_1) Mg + 2\mu_2 W_C \right] = 0 \end{aligned}$$

그러므로 모멘트 평형조건이 만족되기 위해서는 다음 조건이 만족되어야 한다.

$$L_3 \times F = \frac{L}{4} \left[(\mu_2 - \mu_1) Mg + 2\mu_2 W_C \right] \quad (14)$$

즉, 위 조건 식으로부터 이송력의 작용점의 위치가 다음과 같이 결정된다.

$$L_3 = \frac{L}{4F} \left[(\mu_2 - \mu_1) Mg + 2\mu_2 W_C \right] \quad (15)$$

위 (15)식을 검토해 보면;

- ① 앞서의 경우와 마찬가지로 별도의 제어 중량 W_C 를 헤드와 오른쪽 LM 가이드와의 접촉점 상단에 부가하는 것이 이송력 작용점 위치를 오른쪽 LM 가이드쪽으로 치우치게 만드는데 매우 효과적이다.
 - ② 오른쪽 LM 가이드의 마찰계수를 왼쪽 마찰계수보다 크게 해 주는 것이 이송력 작용점 위치를 오른쪽 LM 가이드쪽으로 치우치게 만드는데 도움이 되지만 이 경우에는 앞서 지적한 바와 같이 식(3)과 식(2)식에서 이송력 F 도 함께 증가되어야 하므로 결과적으로 L_3 를 증가시키는 효과가 미미하다.
 - ③ 만약 좌우측 마찰계수가 같다면, 사행동을 일으키지 않는 상태에서 이송력의 작용점을 오른쪽으로 치우치게 만들기 위해서는 전적으로 제어 중량을 부가하는 방법에만 의존할 수 밖에 없다.
- 2) 무게중심이 헤드의 중앙이 아닌 경우
헤드 어셈블리의 무게중심이 헤드의

중앙에 있지 않은 경우에는 $L_1 \neq L_2 \neq L/2$ 이다. 이 경우 평형조건식은 식(12)과 같고 따라서 이송력의 작용점의 위치는 다음과 같이 결정된다.

$$L_3 = \frac{L_1 L_2}{FL} \left[(\mu_2 - \mu_1) Mg + \frac{L}{L_1} \mu_2 W_C \right] \quad (16)$$

위 (16)식을 보면, 이 경우에도 앞서의 검토 내용과 마찬가지로 별도의 제어 중량 W_C 를 헤드와 오른쪽 LM 가이드와의 접촉점 상단에 부가하는 것이 이송력 작용점 위치를 오른쪽 LM 가이드쪽으로 치우치게 만드는데 가장 효과적임을 알 수 있다. 뿐만 아니라 오른쪽 LM 가이드의 마찰계수를 왼쪽 마찰계수보다 크게 해 주는 것이 이송력 작용점 위치를 오른쪽 LM 가이드쪽으로 치우치게 만드는데 도움이 되지만 역시 앞서 지적한 바와 같이 식(3)과 식(2)에서 이송력 F 도 함께 증가되어야 하므로 결과적으로 L_3 를 증가시키는 효과가 미미함을 알 수 있다.

3. 헤드 사행동 저감 대책

앞서 2절의 이론해석 결과를 검토해 보면 다음과 같은 헤드 사행동 저감방법을 고려해볼 수 있다.

3.1 접촉점에 대한 모멘트 평형조건인 경우

1) 무게중심이 헤드의 중앙인 경우

- ① 식(8)을 보면 제어 중량, W_C 를 부가함으로써 L_3 를 획기적으로 증가시킬 수 있다. 즉, 이것은 헤드 사행동을 일으키지 않도록 하면서도 이송력의 작용점 위치를 헤드 무게중심위치로부터 오른쪽 LM 가이드쪽으로 치우치게 만들 수 있음을 의미한다.
- ② 이에 비하여 마찰계수를 증가시키는 것은 식(3)에서 접촉마찰력 R_1, R_2 가 증가되고 따라서 식(2)의 조건으로부터 이송력

F 도 함께 증가되어야 하므로 결과적으로 L_3 를 증가시키는 효과가 미미하다.

2) 무게중심이 헤드의 중앙이 아닌 경우

① 식(10)에서도 식(8)의 경우와 마찬가지로 제어 중량, W_C 를 부가함으로써 L_3 를 획기적으로 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 즉, 사행동 없이 이송력의 작용점을 헤드 무게중심 위치로부터 오른쪽 LM 가이드 쪽으로 치우치게 만들 수 있다.

② 이에 비하여 마찰계수를 증가시키는 것은 식(3)과 식(2)식의 조건으로부터 이송력 F 도 함께 증가되어야 하므로 결과적으로 L_3 를 증가시키는 효과가 미미하기는 마찬가지다.

3.2 헤드의 무게중심에 대한 모멘트

평형조건외의 경우

1) 무게중심이 헤드의 중앙인 경우

① 식(15)을 검토해 보면 앞서의 경우와 마찬가지로 별도의 제어 중량 W_C 를 헤드와 오른쪽 LM 가이드와의 접촉점 상단에 추가하는 것이 이송력 작용점 위치를 오른쪽 LM 가이드쪽으로 치우치게 만드는데 매우 효과적이다.

② 오른쪽 LM 가이드의 마찰계수를 왼쪽 마찰계수보다 크게 해 주는 것이 이송력 작용점 위치를 오른쪽 LM 가이드쪽으로 치우치게 만드는데 도움이 되지만 이 경우에는 앞서 지적한 바와 같이 식(3)과 식(2)에서 이송력 F 도 함께 증가되어야 하므로 결과적으로 L_3 를 증가시키는 효과가 미미하다.

③ 만약 좌·우측 마찰계수가 같다면, 사행동을 일으키지 않는 상태에서 이송력의 작용점을 오른쪽으로 치우치게 만들기 위해서는 전적으로 제어 중량을 추가하는 방법에 의존할 수 밖에 없다.

2) 무게중심이 헤드의 중앙이 아닌 경우

① 식(16)을 보면, 이 경우에도 앞서의 검토 내용과 마찬가지로 별도의 제어 중량 W_C 를 헤드와 오른쪽 LM 가이드와의 접

촉점 상단에 추가하는 것이 이송력 작용점 위치를 오른쪽 LM 가이드쪽으로 치우치게 만드는데 가장 효과적임을 알 수 있다.

② 뿐만아니라 오른쪽 LM 가이드의 마찰계수를 왼쪽 마찰계수보다 크게 해 주는 것이 이송력 작용점 위치를 오른쪽 LM 가이드쪽으로 치우치게 만드는데 도움이 되지만 역시 앞서 지적한 바와 같이 식(3)과 식(2)에서 이송력 F 도 함께 증가되어야 하므로 결과적으로 L_3 를 증가시키는 효과가 미미함을 알 수 있다.

4. 맺는말

본 논문에서는 머시닝 센터의 크로스빔(Cross beam)이나 헤드 어셈블리 등과 같이 중량 물체가 가이드 레일을 따라 갑 가속 이송을 할 때에 흔히 목격되는 蛇行動을 분석하기 위하여 간단한 해석 모델을 제안하고, 작용력과 모우멘트 평형조건식을 이용하여 사행동 발생조건을 구하였다. 이로부터 사행동을 방지하거나 저감시킬 수 있는 몇 가지 방안들을 논의하였다. 앞으로 보다 상세한 마찰기구에 대한 모델링을 도입하여 연구한다면 더 정확한 사행동의 원인분석과 대책이 가능할 것이다.

5. 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터와 (주)두산 기계 BU 공작기계 BG의 지원에 의한 것입니다. 이에 관계자께 감사드립니다.