

이송계에서 이송중량이 동적정도에 미치는 영향

홍 성오(화천기공(주)), 김 홍배(담양대학), 조 규재(조선대)

ABSTRACT

In order to achieve high precision machine tools, the research for performance enhancement of feed drive systems is required.

Development of the high speed feed drive system has been a major issue for the past few decades in machine tool industries. The reduction of the tool change time as well as rapid travel time can enhance the productivity. However, the high speed feed drive system generates more heat in nature, which leads thermal expansion that has adverse effects on the accuracy of machined parts.

Stick-slip friction has a great influence on the contouring accuracy of CNC machine tools. In this paper table levitation system has been developed for the stick-slip in a feed drive systems. And also, the driving position is set near the center of the main slideway. From the results, it is confirmed that yaw error and straightness can be improved.

1. 서론

산업사회의 발달과 더불어 자동차 산업, 기계 산업 등의 기술 향상을 위한 기본적인 장비로 공작기계를 선택할 수 있다. 상용 공작기계의 고정도 고정산성 고강성의 요구조건을 충족시키기 위한 많은 연구들이 산업현장에서 진행되고 있다.¹⁻⁵⁾

공작기계의 이송계는 주축계와 더불어 가공물 가공시 형상정도를 결정하는 중요한 부분으로 가공물 이송에 따른 운동오차를 최소화하기 위한 연구와 구성요소에 대한 연구들이 많이 진행되고 있다. 그러나 현재 상용되고 있는 수평형 머시닝센터의 경우 테이블 형태가 정사각형으로 구성되어 있기 때문에 정사각형 공작물 가공에 적합하나, 직사각형 공작물 가공의 경우 가공능력의 효율성 및 유연성을 저해시키는 원인이 되고 있다. 그러므로 테이블을 직사각형으로 제작하여 정사각형 공작물뿐만 아니라 직사각형 공작물 가공에도 적합한 공작기계 구조형태를 구성함으로써, 고효율 설계가 가능한 방안을 제시하고자 한다. 또한 테이블을 회전시킴으로써 1회 공작물 고정으로 4면을 가공할 수 있는 공작 기계 구조 형태를 구성, 테이블 이송에 따른 진직도 오차를 최소화할 수 있고, 공기부상장치

를 도입하여 테이블의 이송중량을 감소시켜 테이블의 로스트 모션(lost motion)량을 최소화시키며 서보모터, 볼나사, 지지베어링을 경제적으로 설계할 수 있는 안내구조를 연구하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 x·y-요 오차

X축 안내면에서 발생하는 운동 오차 중 x-요 오차(x-y 평면의 안내면 변형)에 대해 X축 안내면과 절대 좌표와의 관계를 나타내었다. X축 안내면 이송 범위의 전체 y_{x-yaw} 오차의 합을 $x-yaw$ 각이 x 좌표에 작용한다고 가정하면 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{x-yaw} = \sum_{k=0}^n a_k x^k \quad (2.1)$$

식(2.1)을 이용하여 x-요 오차를 식(2.2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_x = \tan^{-1} \frac{dx}{dy} = \tan^{-1} \sum_{k=0}^n a_k k x^{k-1} \quad (2.2)$$

3. 실험 방법

수평형 머시닝센터로 X축 테이블 이동에 따른 처짐량 즉, 진직도 오차를 측정하기 위해 정밀 수준기와 오토콜리메이터를 이용하여 가공물 중량을 0, 1300, 2000kg로 변화시키면서 측정하였다.

Fig. 3.1와 같이 테이블의 공기부상은 공기 압력을 0 kg/cm²와 5 kg/cm²로 변화시키면서 실험을 수행하였다. X축 이송계 테이블을 지령이동량에 대한 최소이동량 측정은 오른쪽 위치(원점), 중앙 위치(-1000mm), 왼쪽 위치(-2000mm)의 3지점에서 주축대에 인디케이터를 부착하여 측정하였다.

그리고 Z축 컬럼을 지령이동량에 대한 최소이동량 측정은 오른쪽 위치(원점), 중앙 위치(-450mm), 왼쪽 위치(-900mm)의 3지점에서 주축대에 인디케이터를 부착하여 측정하였다. 또한 Y축 이송계 주축대를 지령이동량에 대한 최소이동량 측정은 Y축 원점복귀점인 상단(원점)과 하단 위치(-1000mm)의 2지점에서 주축대에 인디케이터를 부착하여 측정하였다.

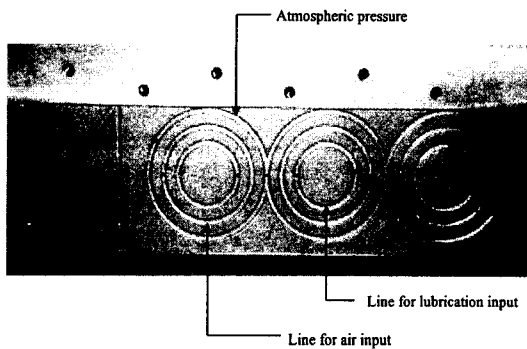


Fig. 3.1 Photograph of air pocket

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 가공 중량과 운동 오차와의 관계

테이블 이송에 따른 오버행 현상의 진직도 변

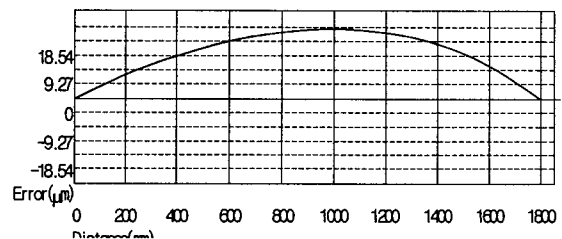
위량의 편차량이 크게 나타남을 알 수 있었다. 이를 최소화하기 위해 테이블이 안내면을 이탈되지 않도록 수평형 머시닝센터를 설계·제작하였다. X축 이송계 테이블의 이송 범위는 1800mm로 하여 가공물을 설치했을 때와 설치하지 않았을 때 중량 변화에 따른 진직도와 운동오차의 변위량을 측정하기 위하여 정밀 수준기와 오토콜리메이터를 이용하였다.

이송 테이블의 진직도 측정은 수평형 머시닝센터의 테이블 중앙에서 가공물을 0kg과 1300kg 및 2000kg으로 중량 변화시키기 위해 정밀 수준기는 테이블 중앙 전면(테이블 전면 50mm지점)에 설치하여 X축 방향의 원점을 시작점으로 이송 범위 구간(1800mm)에서 변위량을 측정하였다. Fig. 4.1(a), (b), (c)는 테이블 위에 가공물을 설치하여 중량을 변화시키면서 이송 범위 위치에 따른 정밀 수준기 측정치를 환산 보정한 진직도 변위량을 나타내었다.

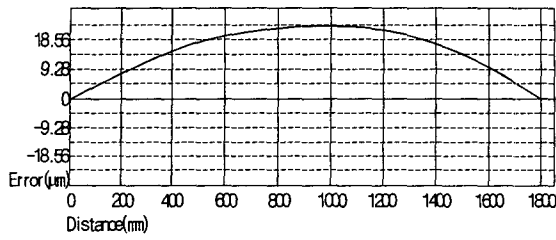
Fig. 4.1(a)는 가공물 중량이 0kg일 때 진직도 23μm를 나타내고, Fig. 4.1(b)은 가공 중량물 1300kg일 때 진직도 23.5μm, Fig. 4.1(c)는 가공 중량물 2000kg일 때 진직도 26.8μm으로 진직도 변위량의 차가 미세함을 알 수 있었다.

정밀 수준기 측정과 같은 방법으로 수평형 머시닝센터에서 이송 테이블 진직도 변위량의 측정 오차를 비교하여 보기 위해 정밀 수준기와 동일 조건으로 테이블을 이송시키면서 오토콜리메이터를 사용하여 측정한 결과를 Fig. 4.2(a), (b), (c)에 나타내었다.

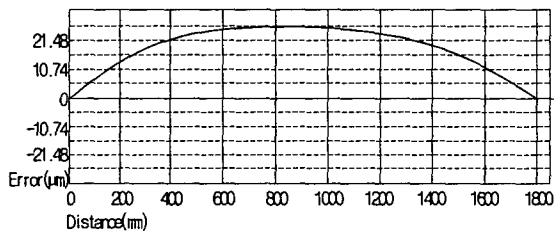
Fig. 4.2(a)는 가공물 중량이 0kg일 때 진직도 23.02μm, Fig. 4.2(b)는 가공물 중량.



(a) Load : 0 kg



(b) Load : 1300 kg



(c) Load : 2000 kg

Fig. 4.1 Measurement of straightness by level

이 1300kg일 때 진직도 $23.5\mu\text{m}$, Fig. 4.2(c)는 가공물 중량이 2000kg일 때 진직도 $27.88\mu\text{m}$ 를 나타냈다. 정밀 수준기로 측정한 Fig. 4.1(a)는 진직도 $23\mu\text{m}$, Fig. 4.1(b)는 진직도 $23.5\mu\text{m}$, Fig. 4.1(c)는 진직도 $26.8\mu\text{m}$ 를 나타내었다. 정밀 수준기로 측정한 Fig. 4.1(a)는 진직도 $23\mu\text{m}$, Fig. 4.1(b)는 진직도 $23.5\mu\text{m}$, Fig. 4.1(c)는 진직도 $26.8\mu\text{m}$ 를 나타내었다

Fig. 4.1(a), 와 Fig. 4.2(a)의 가공물 중량 0kg에서 진직도 편차량은 $0.16\mu\text{m}$ 를 나타냈고, Fig. 4.1(b)과 Fig. 4.2(b)의 가공물 중량 1300kg에서 진직도 편차량은 $0.29\mu\text{m}$ 를 나타냈으며, 또한 Fig. 4.1(c)과 Fig. 4.2(c)의 가공물 중량 2000kg에서 진직도 편차량은 $1\mu\text{m}$ 으로 측정 오차에 영향을 받지 않은 것으로 생각된다.

공작기계의 미끄럼면이 좁고 긴 안내면은 고정밀도를 유지하면서 미끄러짐으로써 고정밀도의 공작할 수 있는 공작기계의 안내방식인 내로 가이드는 테이블 이송에 따른 이송계의 마찰면을 최소화함으로써 마찰열을 감소시켜 안내면의 열변형을 줄일 수 있지만, 내로가이드를 적용한 테이블 안내 구조형태는 테이블 구동 지점이 중앙에 작용되지 않고 편심되어 작용됨으로써 요 오차가 발생된다⁷⁰⁾.

수평형 머시닝센터 이송계에서 테이블 이송시

좌·우방향으로 발생하는 요 오차를 오토콜리메이터를 이용하여 측정하였다. 이송 테이블의 요 오차 측정은 수평형 머시닝센터의 테이블 중앙에서 가공물을 0kg과 1300kg 및 2000kg으로 중량 변화시키면서 블록을 테이블 중앙 전면(테이블 전면 50mm지점)에 설치하고 X축 방향의 원점을 시작점으로 하여 이송 범위 구간(1800mm)에서 200mm 간격으로 테이블 좌측 지면에 설치된 오토콜리메이터로 변위량을 측정하였다.

오토콜리메이터에 의한 진직도 데이터 분석도는 Fig. 4.3(a), (b), (c)와 같다. Fig. 4.3(a), (b), (c)의 가로축은 테이블 이송 위치를, 세로축은 테이블 이송에 따른 요 오차량을 나타냈다.

Fig. 4.3(a)에서 가공 중량물 0kg일 때 테이블 이송에 따른 요 오차는 200mm 이송 구간에서 $1.91\mu\text{m}$, 400mm에서 1200mm 이송 구간은 $0.92\mu\text{m}$ 를 나타내었고, 1400mm에서 1800mm 이송 구간은 $-0.01\mu\text{m}$ 를 나타내었다.

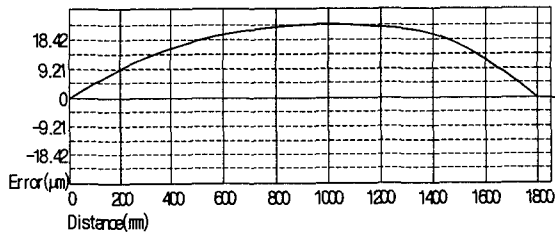
Fig. 4.3(b)에서 가공 중량물 1300kg일 때 테이블 이송에 따른 요 오차는 200mm 이송 구간에서 $2.13\mu\text{m}$, 400mm에서 1000mm 이송 구간은 $1.37\mu\text{m}$ 를 나타내었고, 1200mm에서 1800mm 이송 구간은 $-0.47\mu\text{m}$ 를 나타내었다.

Fig. 4.3(c)에서 가공 중량물 2000kg일 때 테이블 이송에 따른 요 오차는 200mm 이송 구간에서 $2.36\mu\text{m}$, 400mm에서 1200mm 이송 구간은 $1.81\mu\text{m}$ 를 나타내었고, 1400mm에서 1800mm 이송 구간은 $1.91\mu\text{m}$ 를 나타내었다.

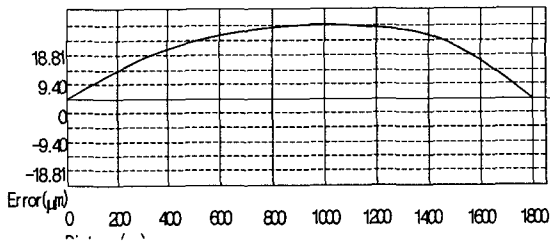
Fig. 4.3(a), (b), (c)의 이송 구간 200mm에서 최대 요 오차량을 나타내는 지점은 새들의 안내면 연삭 공정시 안내면 평행도 오차의 원인으로 생각된다. 또한 가공물 중량이 증가함에 따라 요 오차가 다소 증가했으나 많은 영향을 받지 않은 것을 알 수 있었다.

따라서 본 연구를 위해 제작된 수평형 머시닝센터 X축 이송계에서 Fig. 4.1(a), (a), (b), (c)는 정밀 수준기에 의해 측정된 진직도 변위량을 나타냈고, Fig. 4.2(a), (b), (c)는 오토콜리메이터에 의해 측정된 진직도 변위량, Fig. 4.5(a), (b), (c)는 오토콜리메이터에 의해 측정된 요 오차를 나타낸 실험 결과를 통해 알 수 있듯이 안내면의 길이가 4000mm인 새들 위에 대형 테이블이 설치되도록 설계하여 오버행 현상을 방지하였다.

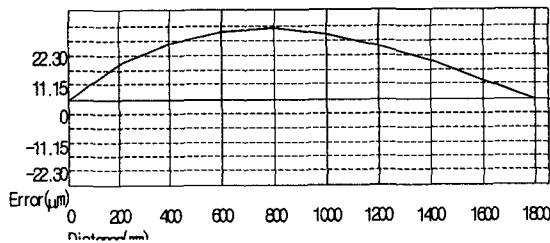
새들이 베이스에 고정되어 있으므로 양 끝단으로 대형 테이블이 이동 할 경우 처짐량을 최소화하기 위해 지지대를 설치하여 진직도 오차를 감소시킬 수 있었고, 새들의 안내면 평행도와 가공물 중량의 변화가 요 오차량에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 또한 테이블의 구동 위치를 중앙점에 설치 구동시킴으로써 편심량을 최소화하여 요 오차를 감소시킬 수 있었다.



(a) Load : 0 kg

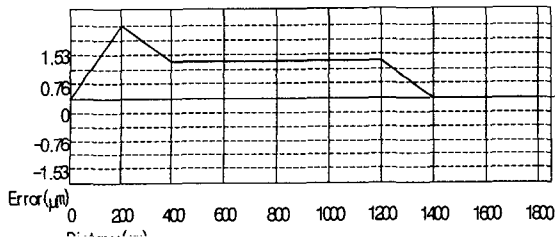


(b) Load : 1300 kg

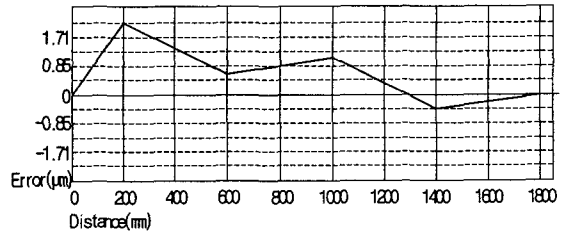


(c) Load : 2000 kg

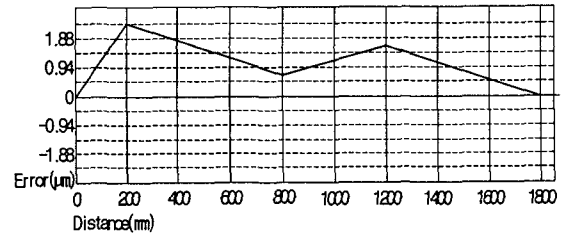
Fig. 4.2 Measurement of straightness by autocollimator



(a) Load : 0 kg



(b) Load : 1300 kg



(c) Load : 2000 kg

Fig. 4.3 Measurement of yaw error by autocollimator

4.2 공기부상력과 최소이동량과의 관계

테이블의 이동 중량 감소 효과를 얻기 위해서 Fig. 3.1과 같이 공기 부상 장치를 설계·제작하였다. 테이블 위에 가공물을 설치하지 않았을 때와 가공물을 설치했을 때, 공기 부상 장치에 의한 테이블의 이동지령량에 대한 실이동량을 측정하기 위해 인디케이터를 이용하였다.

X축 이송계의 테이블 최소 이동량 측정은 오른쪽 위치(원점), 중앙 위치(원점에서 -1000mm 지점), 왼쪽 위치(원점에서 -2000mm 지점) 3지점으로 구분하여, 공기 부상 장치에 의한 영향을 찾기 위해 최소이동단위인 1 μ m씩 수동 핸들로 20 μ m까지 이동시켰을 때 테이블 이동량을 측정하였다.

Fig. 4.4(a), (b), (c)의 가로축은 이동지령량을 나타내고, 세로축은 이동지령량에 대한 실행값을 나타내었다. 테이블 위에 가공물을 설치하지 않았을 때 오른쪽 위치, 중앙 위치, 왼쪽 위치에서 공기 압력을 0 kg/cm²와 5 kg/cm²로 구분하여 테이블 이동량의 측정 결과를 나타내었다.

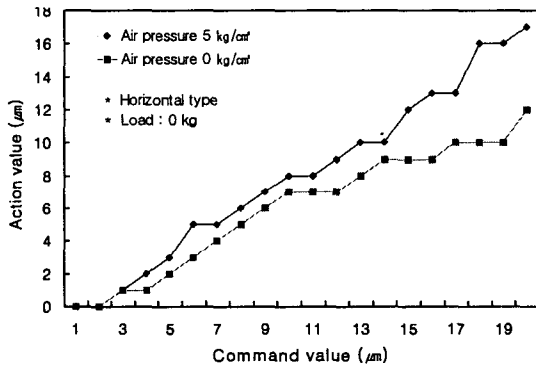
Fig. 4.4(a)은 가공물을 장착하지 않았을 경우

이동지령량 20 μm 까지 테이블을 이동시켰을 때, 오른쪽 위치(원점)에서 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 테이블 이동량은 12 μm 를 나타내었고, 공기 압력이 5 kg/cm²일 때 테이블 이동량은 17 μm 를 나타내었다.

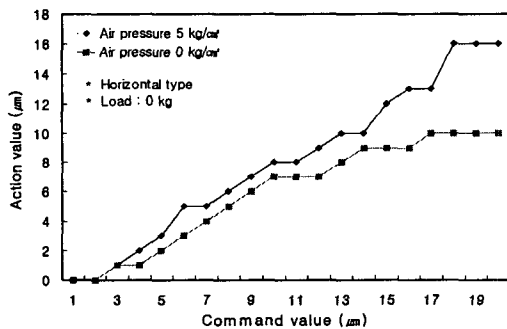
같은 조건으로 Fig. 4.4(b)은 중앙 위치(원점에서 -1000mm 지점)에서 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 테이블 이동량 12 μm 를 나타내었고, 공기 압력이 5 kg/cm²일 때 테이블 이동량은 17 μm 를 나타내었다.

또한 Fig. 4.4(c)은 왼쪽 위치(원점에서 -2000mm 지점)에서 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 테이블 이동량은 12 μm 를 나타내었고, 공기 압력이 5 kg/cm²일 때 테이블 이동량은 17 μm 를 나타내었다.

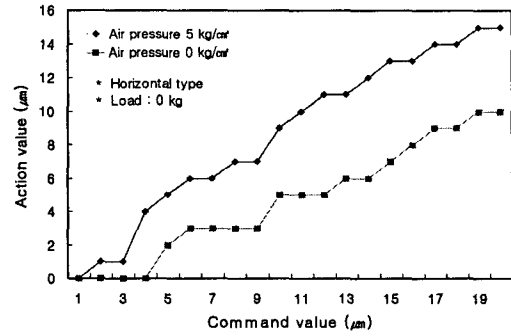
그러므로 Fig. 4.4(a)는 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 12 μm 과 5 kg/cm²일 때 17 μm 으로 5 μm 의 편차량을 나타내었고, Fig. 4.4(b)는 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 10 μm 과 5 kg/cm²



(a) Light



(b) Center



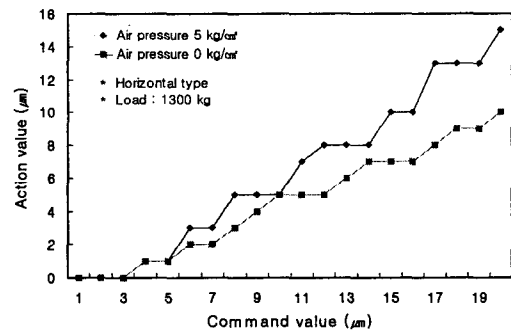
(c) Left

Fig. 4.4 Relation between command value and action value in the load 0 kg

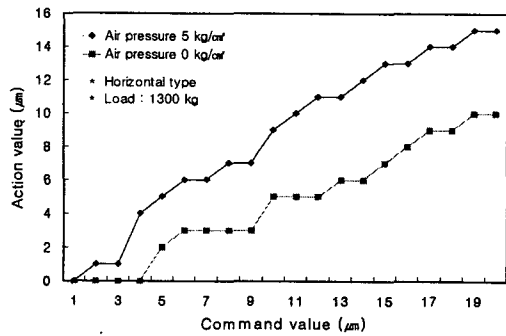
일 때 16 μm 으로 6 μm 의 편차량을 나타내었으며, Fig. 4.4(c)는 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 10 μm 과 5 kg/cm²일 때 15 μm 으로 5 μm 의 편차량을 나타내었다.

공기 부상 압력의 변화에 따른 테이블을 이동시킬 때 지령이동량과 실테이블 이동량과의 편차량 변화는 Fig. 4.4(a), (b), (c)에서 알 수 있듯이 5 kg/cm² 공기 압력 Fig. 4.5(a), (b), (c)는 테이블 위에 가공물을 설치하였을 때 오른쪽 위치, 중앙 위치, 왼쪽 위치에서 공기 압력이 0 kg/cm²와 5 kg/cm²로 구분하여 1 μm 씩 20 μm 까지 이동시켰을 때 테이블 이동량의 측정 결과를 나타내었다.

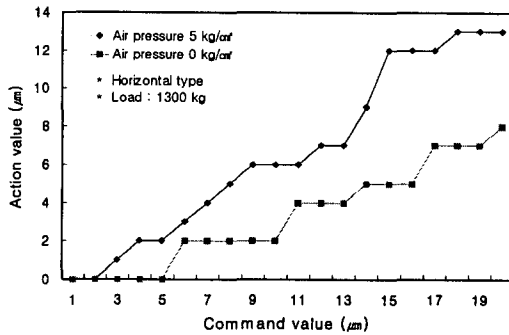
Fig. 4.5(a)는 가공물 중량 1300 kg에서 이동지령량 20 μm 까지 테이블을 이동시켰을 때 오른쪽 위치에서 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 테이블 이동량은 10 μm 를 나타내



(a) Light



(b) Center



(c) Left

Fig. 4.5 Relation between command value and action value in the load 1300 kg

었고, 공기 압력이 5 kg/cm²일 때 테이블 이동량은 15μm를 나타내었다.

같은 조건으로 Fig. 4.5(b)는 가공물 중량 1300kg과 중앙위치에서 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 테이블 이동량은 10μm를 나타내었고, 공기 압력이 5 kg/cm²일 때 테이블 이동량은 15μm를 나타내었다. 또한 Fig. 4.5(c)는 가공물 중량 1300kg과 왼쪽 위치에서 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 테이블 이동량 8μm를 나타내었고, 공기 압력이 5 kg/cm²일 때 테이블 이동량 13μm를 나타내었다.

그러므로 Fig. 4.5(a)는 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 10μm와 5 kg/cm²일 때 15μm으로 5μm의 편차량을 나타내었고, Fig. 4.5(b)는 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 10μm와 5 kg/cm²일 때 15μm으로 5μm의 편차량을 나타냈으며, Fig. 4.5(c)는 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 8μm와 5 kg/cm²일 때 13μm으로 5μm의 편차량을 나타내었다.

Fig. 4.4(a), (b), (c)와 Fig. 4.5(a), (b), (c)의 결과를 살펴보면 Fig. 4.4(a)는 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 12μm와 5 kg/cm²일 때 17μm, Fig.

4.5(a)에서 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 10μm와 5 kg/cm²일 때 15μm으로 공기 압력 0 kg/cm²보다 5 kg/cm²에서 테이블 이동량에 대해 최소 이동량이 증가됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 공기 부상 장치를 적용하였는데 이것의 장점은 공기 압력에 의해 테이블 중량을 감소(3768 kg, 포켓 수:12개)시키므로 중량에 의한 응답성 영향을 최소화하여 로스트 모션량을 최대한 제거할 수 있다는 점이다.

이송계 구성요소 측면에서 살펴보면 공기 부상 장치를 적용함으로써 테이블 중량 감소 효과가 있으므로 이송계 설계시 구동 모터와 볼나사 및 지지 베어링 부하 용량을 선택할 경우 감소 효과에 따른 테이블 중량으로 구성함으로써 원가절감을 실현할 수 있다고 생각된다.

또한 테이블의 위치에 따른 응답성 변화 원인으로 테이블과 서보모터 사이의 거리의 영향, 스크래핑 정도, 칩을 방지하기 위한 커버, 안내면의 오일량, 안내면의 가공정도, 안내면 자체의 진지도 영향에 대한 고찰로 향후 연구되어야 한다고 생각된다.

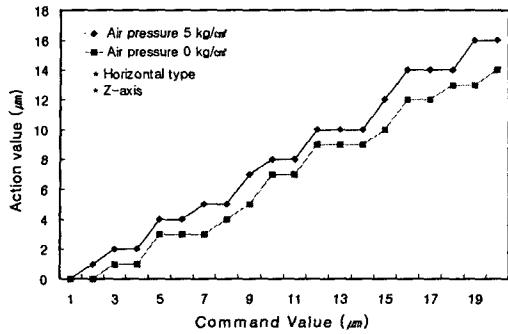
그리고 이동 중량을 감소 효과를 얻기 위해 Fig. 3.1과 같이 공기 부상 장치를 설계·제작하였다. 공기 부상 장치에 의한 컬럼의 이동량을 측정하기 위해 인디케이터를 이용하였다. Z축 이송계 컬럼의 최소 이동량 측정은 작업자가 조작반 위치에서 보았을 때 오른쪽 위치(원점), 중앙 위치(원점에서 -450mm 지점), 왼쪽 위치(원점에서 -900mm 지점) 3지점으로 구분하여 공기 부상 장치에 의한 영향을 찾기 위해 본 연구의 최소이동단위인 1μm씩 수동 핸들로 20μm까지 이동시켰을 때 컬럼 이동량을 측정하였다.

Fig. 4.6(a), (b), (c)의 가로축은 이동지령량을 나타내고, 세로축은 이동지령량에 대한 실행값을 나타내었다. 오른쪽 위치, 중앙 위치, 왼쪽 위치에서 공기 압력이 0 kg/cm²와 5 kg/cm²로 구분하여 컬럼 이동량의 측정 결과를 나타내었다.

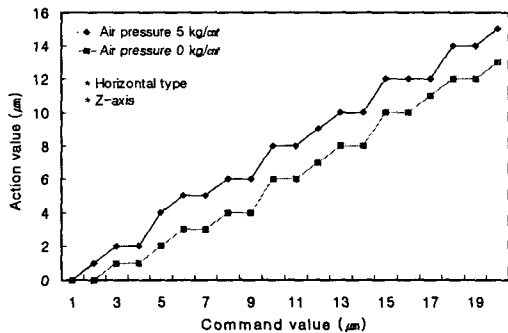
Fig. 4.6(a)은 이동지령량 20μm까지 컬럼을 이동시켜 오른쪽 위치(원점)에서 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 컬럼 이동량은 14μm를 나타내었고, 공기 압력이 5 kg/cm²일 때 컬럼 이동량은 16μm를 나타내었다.

같은 조건으로 Fig. 4.10(b)은 중앙 위치(원점에서 -450mm 지점)에서 공기 압력이 0 kg/cm²

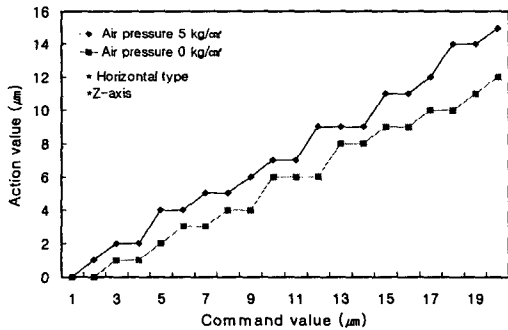
일 때 컬럼 이동량은 13 μm 를 나타내었고, 공기



(a) Light



(b) Center



(c) Left

Fig. 4.6 Relation between command value and action value in the z-axis

압력이 5 kg/cm²일 때 컬럼 이동량은 15 μm 를 나타내었다. 또한 Fig. 4.6(c)은 왼쪽 위치(원점에서 -900mm 지점)에서 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 컬럼 이동량은 12 μm 를 나타내었고, 공기 압력이 5 kg/cm²일 때 컬럼 이동량은 15 μm 를 나타내었다. 그러므로 Fig. 4.6(a)는 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 14 μm 과 5 kg/cm²일 때 16 μm 으로 2 μm 의 편차량을 나타내었고, Fig. 4.6(b)은 공기 압

력이 0 kg/cm²일 때 13 μm 과 5 kg/cm²일 때 15 μm 으로 2 μm 의 편차량을 나타내었고, 또한 Fig. 4.6(c)에서는 공기 압력이 0 kg/cm²일 때 12 μm 과 5 kg/cm²일 때 15 μm 으로 3 μm 의 편차량을 나타내었다.

공기 압력의 변화에 따라 컬럼을 이송시켰을 때 컬럼 이동량의 변화를 Fig. 4.6(a), (b), (c)에서 알 수 있듯이 5 kg/cm² 공기 압력의 부상 장치에 적용되면 컬럼이 부상됨에 따라 중량 감소 효과를 얻어 컬럼 이동량이 변화된다고 사료된다. 그리고 컬럼 이동량이 X축 이송계와 비교하여 보았을 때 편차량이 적은 것은 컬럼 자체의 자중이 무거워 부상장치에 의한 효과가 적어지는 것으로 생각된다.

5. 결론

고정도 고생산성을 위한 수평형 머시닝센터를 설계·제작하여 이송계 테이블(2000×1200mm)에 직사각형 대형부품 가공에 적합한 구조형태를 채택하여 산업현장에 적용하였고, 테이블 이송에 따른 진직도 오차와 요 오차를 비교실험을 통하여 최적화 하였다.

따라서 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수평형 머시닝센터 테이블에 가공물을 장착하지 않았을 때보다 가공물을 장착하였을 경우 진직도는 4.8 μm 정도와 요 오차량은 0.4 μm 정도 증가됨을 알 수 있었다.
- 2) 이송계 테이블과 컬럼에 공기부상장치를 적용하지 않은 경우보다 공기부상장치를 적용하여 이송시 이동지령량에 대한 실이동량 측정값은 테이블에서는 5~6 μm , 컬럼에서는 2~3 μm 정도 개선되었음을 알 수 있었다. 또한 주축대에서는 상단, 하단 이동의 경우 6 μm 정도 편차량을 나타내었다.

참고문헌

1. J. F. Tu, J. L. Stein. "Active Thermal Preload Regulation for Machine Tool Spindles with Rolling Element Bearings", *Journal of Manufacturing Science and*

- Engineering, Vol. 118: pp.499-505, 1996.
2. 연세대학교. "고정밀 가공 및 측정기술에 관한 연구", 통산산업부 과학기술처, 3차년도 연차 보고서: pp.148-174, 1995.
 3. W. H. Chieng, J. M. Lai, J. S. Liao. "Modeling and Analysis of Nonlinear Guideways for Double-Ball Bar (DBB) Measurement and Diagnosis", *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 37, No. 5: pp.687 - 707, 1997.
 4. Y. S. Taring, H. E. Cheng. "An Investigation of Stick-slip on the Contouring Accuracy of CNC Machine Tools", *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 35, No. 4: pp.565 - 576, 1995.
 5. J. Y. Kao, Z. M. Yeh, Y. S. Taring et al.. "A Study of Backlash on the Motion Accuracy of CNC Lathes", *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 36, No. 5: pp.539 - 550, 1996.
 6. 홍성오, 조규재, 김재열. "CNC 선반에서 불나사 열변형에 따른 위치결정 정도 개선에 관한 연구", 『한국공작기계학회지』 8: pp.45-51, 1999.