

이송계에서 베어링 조합 배열과 예압량에 관한 연구

홍 성 오(조선대 대학원), 조 규 재 (조선대)

A Study on Preload and Arrangement of Combined bearing on Feed Drive system

Sung-oh Hong, Gyu-jae Cho

ABSTRACT

One of the important technical issues is how to decrease thermal expansion of ballscrew in proportion to the increase of machining speed. when measuring force of stretch of ballscrew, since not only actual expansion and the value of bending have to be considered, it's impossible to definite the exact value of expansion. In addition, support bearings of ballscrew gain considerable force in axial direction. It also generates thermal expansion on the ballscrew, and deteriorates the bearings. In conclusion, it's impossible to give the pretension enough to absorb the all elongation due to thermal expansion generated during machine running. If gave, bed, column and saddle are all bent to change machine accuracy, and the support bearings of ballscrew are damaged.

The purpose of this paper is to study the pretension of support bearing of ballscrew in machine tool.

Key Words : Thermal Expansion (열팽창), Ballscrew (볼나사), Machining Accuracy(가공 정밀도), Machine Tool(공작기계),

1. 서론

생산 가공 기술의 향상과 더불어 공작 기계의 수요가 확대되고 있으며, 오늘날 기계 가공에 있어서 공작 기계는 가장 기본적인 생산 설비로서 일반화되고, 자동화 대응, 가공 정도의 향상, 납기 단축, 원가 절감 등 다양한 목적으로 적용되고 있다. 이와 같은 공작기계의 구성은 주축계, 이송계, 지지계로 크게 구분 할 수 있는데, 그 중에 이송계는 주축계와 같이 공작물의 형상 정도를 결정하는 중요한 운동 요소이다. 이송계의 구성 요소는 안내면(Slide way), 볼나사, 지지 베어링, 서보 모터 등으로 구분할 수 있다. 회전 운동을 직선운동으로 변화시키는 구성 요소로는 볼나사가 있는데, 볼나사 지지 구조에는 볼나사 축의 온도 상승과 예상력 부가 여부에 따라서 고정-지지, 고정-반고정, 고정-고정 지지 구조로 크게 구분 할 수 있다. 지지 베어링부는 이송계가 작동하게 되면 볼나사의 축과 너트 사이의 마찰에 의한 온도 상승의 원인이 되고 이와 더불어 온도상승은 볼나사 길이의

변화를 동반하여 지지 베어링에 영향을 주게 한다. 따라서 외부 하중에 대한 지지 능력과 더불어 변형량을 극소화하여야 한다. 본 연구에서 다루고 있는 앵글러 콘택트 볼 베어링은 구조적 특성으로 인해 단일 베어링으로는 축 방향 하중에 대해 한 쪽 밖에 지지할 수 없다. 그러므로 앵글러 콘택트 볼 베어링은 두개 이상을 조합하여 사용한다. 이송계의 특성에 따라 조합 방법을 결정하는데 주로 조합된 베어링의 갯수와 방향에 따라 DF 조합(Face to Face Set), DB 조합(Back to Back Set), DT 조합(Tandom Sat)으로 구분할 수 있다.

이와 관련된 연구를 살펴보면 공작기계 볼나사의 열변형과 보상법에 대하여 Yoshiaki⁽¹⁾등은 운전 중에 이송(Feed), 서보 모터의 전류 값을 이용한 볼나사 열변위 보정에 대하여, Mitsuyasu⁽²⁾등은 기계의 온도상승 예측량으로 보정 기능을 이용한 열변위 기능을 연구하였으며, Yamaguchi⁽³⁾는 볼나사의 열팽창과 위치결정 정도의 영향에 대하여 연구하였다.⁽⁴⁻⁷⁾ 그 외에도 볼나사의 열팽창에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 볼나사 지지 베어

링에 관한 연구는 아주 미흡한 상태이고, 생산현장의 실정에 따라 적용되고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 CNC 선반의 볼나사 지지 베어링의 배열방식과 최적의 조합방법을 실험을 통해서 찾아보고 상용되는 공작기계에서 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 나사축 지지 구조의 영향

나사축의 지지구조를 고정-고정으로 하면 온도는 상승해도 열변위는 탄성변위 범위를 유지하므로 고정도화에 대해서 유리하지만 그것에 비해서 온도상승에 비례한 하중이 지지베어링에 이동하게 되면, 조건에 의해서 나사축 베어링의 내구성이 문제가 되기도 하고 기계 본체를 변형시키는 가능성이 있다.

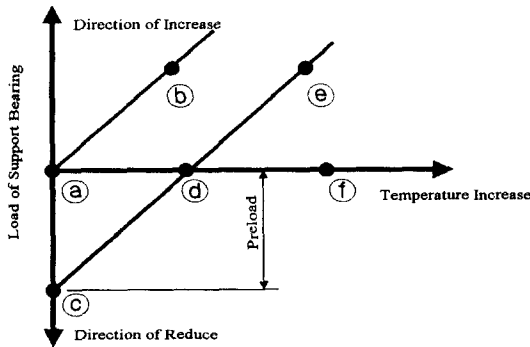


Fig.1 Load of Support bearing for Temperature crease

Fig.1에서 ㉑㉒와 같은 선도의 경우 온도 상승과 베어링에 부가되는 하중과의 관계를 정상적으로 나타내고 있는데, 고정-고정의 지지구조에서 나사축에 예장력을 부여하면, 조립부와 지지베어링에는 나사축이 수축방향에 하중이 가하게 되기 때문에 ㉓㉔㉕ 선도와 같이 평행이동을 하여 온도 상승에 따른 베어링의 부하를 보상할 수 있다. 온도 상승이 큰 고정-고정 지지구조가 아닌 경우 고정-지지에서 지지축은 열변위에 대응해서 축 방향에 슬라이드 가능한 구조가 되어, ㉖㉗㉘와 같은 선도와 같이 표현할 수 있는데, 베어링에는 온도상승에 따른 하중은 부가

되지 않지만 나사축의 열변위가 크게 된다. 이와 같은 경우에는 고정-반고정의 구조로서 나사축의 예장력을 부여하는 대책으로 많이 사용되고 있는데, 반고정에서 예장력을 부여하는 지지구조를 Fig.2에 표시하였다. 반고정은 나사축이 수축방향에는 고정, 신축방향에는 자유가 되도록 하는 구조이고 온도상승은 축 방향 하중에 의해서 예장력이 부여될 때까지는 고정-고정과 동일한 조건이 되고 그 이상에는 고정-지지와 같은 효과를 얻을 수 있고, ㉑㉔㉕와 같은 선도가 되는데, 열변위는 예장력에 상당하는 양만큼 감소하게 된다. 한편 고정-고정 예장력의 지지구조는 온도상승이 큰 경우에 채용 가능하지만 미세한 온도변화에 대해서는 흡수, 포화가 가능하다. 따라서 양자의 병용하는 일에 의해서 고정도의 위치결정을 기대할 수 있다고 생각한다.

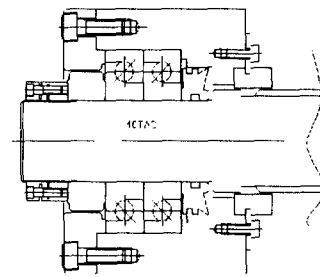


Fig.2 Structure of support fix-semi fix for DT type

2.2 베어링 조합과 고정

정밀 볼나사 서포트용 스러스트 앵글러 볼 베어링은 일반적으로 2개 이상의 베어링을 조합하여 예압을 부여하여 사용하는데, 조합방식에는 Fig.3과 같이 2열, 3열, 4열등이 있고 베어링의 정면을 맞대어 조립한 정면 조합(DF, DFD, DFF, DFT), 배면 조합(DB, DBD, DBB, DBT), 병렬조합(DT, DTD, DTT)이 있고, 일반적으로 DF형의 조립방법을 많이 적용하고 있는데, 이는 베어링의 외륜과 내륜 사이에 있는 볼과의 접촉점의 연장선이 나사축의 중심선과 만나는 2개의 교차점의 거리가 DB조합보다 크기 때문에 축의 휨을 지지하는 능력이 크기 때문이다. 그러나 양단 지지부의 베어링 외륜의 원통도가 가공오차 때문에 좀 틀릴 경우에 DB조합은 자동

조심능력이 DF조합보다 크고, 원통도가 많이 틀릴 경우에 DF조합을 사용하면 나사축이 휘어지는 응력을 받을 수 있다.

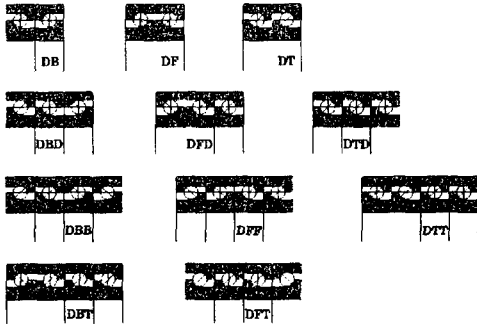


Fig.3 Some of the many possible configurations for angular contact bearings

또한 기계정도는 열팽창과 관계없이 기계조립으로부터 얻어지므로, 볼나사의 당기는 힘을 측정할 때 실패장 뿐만 아니라 굽힘량도 고려하여야 하므로 팽창의 정확한 값을 규정할 수 없고, 지지베어링은 축방향으로 많은 힘을 받으므로 이로 인하여 볼나사에 열팽창을 일으키고 지지베어링에 악영향을 미친다. 따라서 기계가동으로 발생하는 열팽창으로 발생하는 볼나사의 신장량을 충분히 흡수 할 수 있는 예장력을 부여할 수 없다. 만약 부여 할 경우 베드, 컬럼, 새들이 모두 변형되어 기계의 정도를 변화시켰을 것이고 지지 베어링도 손상될 것이다. 그러므로 지지 베어링에 적절한 예압량은 부여하는 일이 중요하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험기기 및 장치

CNC 선반의 볼나사에 대한 온도변화를 측정하여 온도 상승에 따른 볼나사의 열변형량을 측정하고, 열변위량에 따른 적절한 예장력의 적용 정도를 고찰하며, TAC 볼베어링(Thrust Angular Contact Ball Bearing) 최적의 배열방법을 찾기 위한 실험장치는 Photo.1과 같다. Photo.1과 같이 볼나사(NSK) 베어링 지지대(Bracket)를 제작하여, TAC 볼베어링으로 고정

하는 방식으로, 한방향(좌측) 지지점은 완전 고정하고 반대편(우측)은 베어링의 배열조합방법을 쉽게 교체할 수 있도록 제작하였다.

본 실험장치에서는 베어링 조합방법형태에 따른 열변위량을 측정하기 위하여 볼나사에 니크롬 열선을 감아 볼나사의 온도상승을 유도하였다. 온도 변화에 따른 열변위량을 측정하기 위하여, 볼나사 끝단에 볼을 부착하고, 고정용 지그를 사용하여 갭 센서 (Gap Sencer, AEC-5306D) 장치를 고정설치, 측정하였고, 볼나사 표면온도 변화량을 측정을 위하여 서머메터(YOKOGAWA, DR130) 장치를 사용하여 측정하였고, 볼나사는 누적대표 리드오차 (E)가 $13\mu\text{m}$ 이고 변동오차가 2π 당 $6\mu\text{m}$ 인 C3등급이며, 예압을 가하기 위하여 인디게이터 플랫폼형 (Indicator Flat type) 토크렌치(Torque Wrench, Kanon, 450K)을 사용하여 측정 하였다.

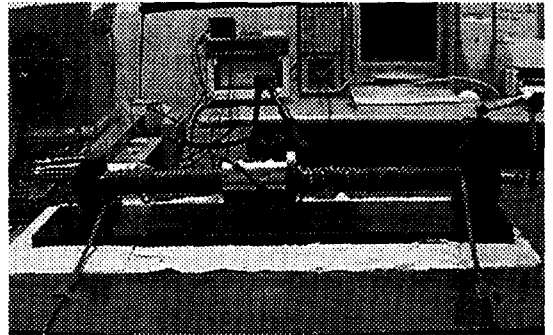


Photo.1 Schematic diagram of experimental apparatus

4. 실험결과 및 고찰

볼나사에 온도변화에 따른 열변위량을 지지베어링의 조합방법 형식에 따라, 예장력을 부여하지 않는 경우의 열변위량과, 예장력을 부여한 경우, Free type, D type, DT type, DBD type, DBT type의 열변위량을 측정 결과를 나타내었다.

Fig.4는 Free type 조립형식에서 볼나사의 온도변화에 따른 열변위량을 나타낸 결과이다. 가로축은 온도변화량을, 세로축은 볼나사 열변위량을 나타내고 있다. 그림에서와 같이, 상온 20°C 에서 볼나사의 온도 상승에 따라 변위량이

증가하고 있음을 알 수 있고, 볼나사의 표면온도를 40℃까지 올렸을 때, 열변위량은 190 μm 정도임을 알 수 있었다. 이론변위값과 실제온도에 따른 변위값을, Fig. 4에서 비교해보면 변위량이 감소되고 있는데, 이는 볼나사의 온도가 볼나사에 전체적으로 온도가 상승하지 않고, 볼나사의 끝단부의 온도상승량 차이로 사료된다.

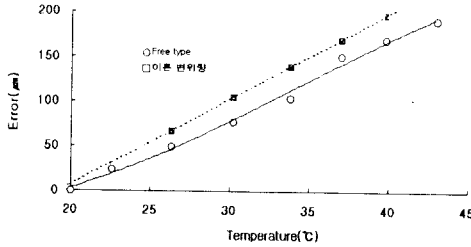


Fig 4. The measured thermal displacement relative to the temperature by the bearing Free TYPE.

또한 볼나사 축의 축방향 강성은 60kg/ μm 이고, 지지간 거리는 800mm, 축경은 $\phi 32\text{mm}$ 의 경우, 온도에 따른 열변위 오차량을 최소화하기 위해 설계한 트렌드 리모벌(Trend Removal)과정을 수행하고, 베어링의 조립형식과 예장력에 따른 변위량을 측정 한 값을 Fig.5에서 Fig.8까지 나타내었다.

Fig.5에서 Fig.8까지 도시한 바와 같이, Fig.5의 D type에서는 예장력 800kg을 주었을 때, 40℃에서 100 μm , 예장력을 가하지 않았을 때는 150 μm 변화하였고, Fig.6의 DT type에서는 예장력을 가했을 때 18 μm , 예장력이 없을 때는 70 μm 로 변화되어, 예장력에 의한 효과로 52 μm 의 변위오차량이 감소됨을 알 수 있었다. Fig. 7의 DBD type에서는 예장력을 주었을 경우, 1.5 μm 변화하였고, 예장력을 가하지 않았을 때는 13 μm 변화하고 있음을 알 수 있었다. 이때 변위오차량은 11.5 μm 이 감소하였다. 또한 네 개의 베어링을 Fig. 8의 DBT type으로 배열하였을 경우 예장력을 주었을시 2 μm , 예장력을 가하지 않았을 때는 9 μm 의 열변위량을 보이고, 변위오차량의 감소는 7 μm 이다. 또한 온도에 따른 예장력이 주어졌을 때와 예장력이 주어지지 않았을 때, 열변위량에 따른 베어링 배열방법을 고려키 위하여 실험치에서 얻어진 구간별 온도변화와 변위

값을 최소자승법을 이용하여 수식을 구하였다.

Fig.6의 DT type인 경우 예장력을 주었을 때, $y=0.92x-16.30$ 의 식으로, 예장력을 주지 않았을 경우 $y=3.08x-52.25$ 의 결과식을 얻을 수 있었다.

식으로부터 예장력을 주었을 경우 1℃ 온도차에 대한 변위오차량은 0.92 μm 이었으나, 예장력을 주지 않았을 때, 3.1 μm 의 차가 있었고, 예장력을 주었을 때 2.08 μm 의 변위오차량의 차가 있었다. 또한 Fig.7의 DBD type에서는 예장력을 주었을 때, $y=0.07x-0.69$ 의 식으로부터 1℃ 온도차에 대한 변위오차량은 0.07 μm 이었고, 예장력을 주지 않았을 때에는 $y=0.52x-9.73$ 의 식으로부터, 변위오차량은 0.52 μm 이 됨을 알 수 있었고, 예장력을 주었을 때, 0.45 μm 변위오차량 차가 있음을 알 수 있다. 이상의 실험 결과로부터, 일정하게 800kg의 예장력을 적용하였을 때, 예장력을 주었을 때와 주지 않았을 때, DT type은 52 μm 오차량 차가 있었고, DBD type에서는 11.5 μm 오차량 차가 있었으며, 1℃ 온도변화에 따른 변위오차량으로부터, DT type에서 0.92 μm 으로, DBD type에서 0.07 μm 으로 안정화시킬 수 있었으며, 결과와 같이 적절한 예장력의 효과를 확인할 수 있었다. 그러나 볼나사의 지지베어링의 선정에서, 원가상승을 고려해서 가장 적절한 형식을 선택해야 하고, 예장력을 무리하게 추가하는 경우, 지지 베어링의 파손 및 수명에 영향을 줄 수 있으므로, 본 실험장치를 이용하여 실험한 결과에서 알 수 있듯이 예장력 부가는 볼나사의 길이에 대하여 1~2℃ 범위에서 예장력을 가하는 것이 필요하다.

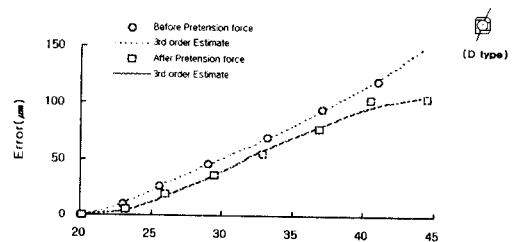


Fig 5. The measured thermal displacement relative to the temperature by the bearing D TYPE.

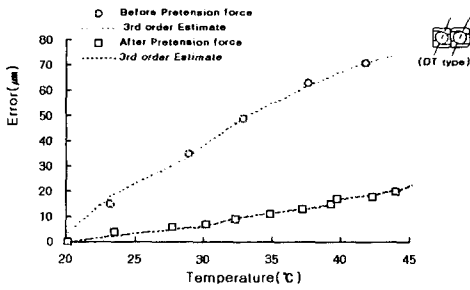


Fig 6. The measured thermal displacement relative to the temperature by the bearing DT TYPE.

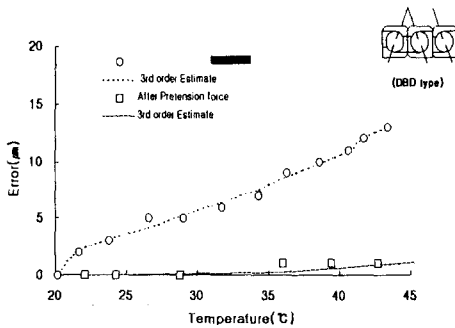


Fig 7. The measured thermal displacement relative to the temperature by the bearing DBD TYPE.

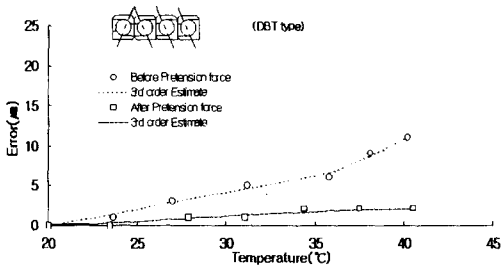


Fig 8. The measured thermal displacement relative to the temperature by the bearing DBT TYPE.

Fig.9, 10은 본 실험을 검증하여 보기 위해 현재 상용되고 있는 CNC 선반 (화천기계 : Hi - ECO10, Hi - ECO31A) 에서 지지베어링(TAC. ball bearing) 1열 구조로써 예장력이 225kgf를 가한 D type 과 2열 구조로써 예장력이 500kgf를 부여한 DF type의 지지 베어링에서 실험을 실시하여 검증하였다. Fig.9와 Fig.10에서 알 수

있듯이 D type 보다 DF type의 지지 구조에서 예장력 부여에 따른 효과를 검증할 수 있었다.

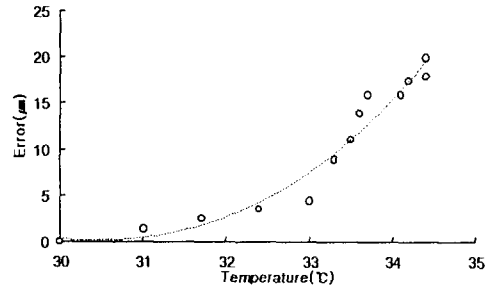


Fig 9. The measured thermal displacement relative to the temperature by the bearing D TYPE.

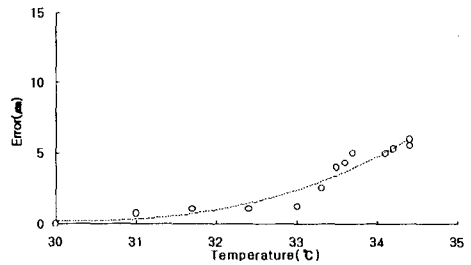


Fig 10. The measured thermal displacement relative to the temperature by the bearing DF TYPE.

5. 결론

이송계를 구성하는 중요한 구성요소인 볼나사 지지베어링의 배열과 지지구조를 변화시키면서 여러 종류의 배열 형태의 변화값을 통해 적절한 예장력을 제시하고자 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 지지베어링의 조합방법에 따른 영향과 예장력의 효과를 확인할 수 있었고 위치결정 오차량을 억제하기 위해 적절한 조합방법과 예장력 부가가 필요함을 알 수 있었다.

2) 지지베어링의 조합방법에 따른 열변위량을 Free(자유단)에서는 볼나사의 온도가 40℃에서 190 μ m을, DBD 조합방법에서 13 μ m으로 억제효과를 확인할 수 있었고, 예장력(800kgf)을 추가했을 때는 열변위량이 1.5 μ m로서 예장력에 따라 약 20%로 억제할 수 있었다.

3) 지지 베어링의 과도한 예장력은 베어링의 파손의 위험이 있으므로 예장력 부가는 볼나사의 길이에 대하여 1 - 2℃ 범위에서 예장력을 가하는 것이 필요하다.

참고문헌

- (1) Yoshiaki Kakino, Kazuaki Mori, "A Study of Compensation of Thermal Displacement of the Ball Screw in NC Machine Tools", JSPE, Vol. 54, No. 9, pp. 1753 - 1758, 1988.
- (2) Mitsuyasu Matsuo, Takeshi Yasui, "A Method of Thermal Displacement Compensation for Machining Center by Temperatures Measured on the Machine (2nd Report) - Automatic Compensation Using an NC Controller Marketed", JSPE, Vol. 57, No. 6, pp. 1066 - 1071, 1991.
- (3) Yamaguchi, "Influence of Ball Screws and Slide Ways on Positioning Accuracy", NSK Technical Journal, No. 650, 1989.
- (4) Toshiaki Yamaguchi, "High Performance Technology in Ball screw", 精密工學會誌機械, Vol. 61, No. 3, pp. 333 - 338, 1995.
- (5) Masaomi Tsutsumi, Kouji Hanakuri, "Influence of the Position of Driving Force Application on the Characteristics of Slideways", 精密機械, Vol. 47, No. 6, pp. 19 - 24, 1981.
- (6) 二官瑞穂, "ボールねじの發熱と對應策", 應用機械工學, No. 4, pp. 98 - 103, 1987.
- (7) 홍성오, 조규재, 김재열, "CNC 선반에서 볼 나사 열변형에 따른 위치결정 정도 개선에 관한 연구", 한국공작기계학회지. 제8권, 제1호, pp.45-51,