

베어링 조합방법이 이송축 열변위에 주는 영향에 관한 연구
홍 성 오(조선대), 김 선 진(조선대), 조 규 재 (조선대)

A Study of Influence on the Thermal deflection of the Feed system in the
Bearing Arrangement method
Sung-oh Hong, Sun-jin Kim, 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 일 반화되고, 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 이송 계는 주축계와 같이 공작물의 형상 정도를 결정하는 중요한 운동 요소이다. 이송계의 구성 요소는 안내면(Slide way), 볼나사, 지지 베어링, 서보 모터등으로 구분 할 수 있는데, 회전 운동을 직선 운동으로 변화 시키는 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 주 게 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 한쪽 밖에 지지할 수 없다. 그러므로 앵글러 콘택트 볼 베어링은 두개 이상을 조합하여 사용한 다. 이송계의 특성에 따라 조합 방법을 결정하는 데 주로 조합된 베어링의 갯수와 방향에 따라 DF 조합(Face to Face Set), DB 조합(Back to Back Set), DT 조합(Tandem Sat)으로 구분할 수 있다. 이와 관련된 연구를 살펴보면 공작기계 볼 나사의 열변형과 보상법에 대하여 Yoshiaki⁽¹⁾등은 운전 중에 이송(Feed), 서보 모터의 전류 값을 이용한 볼 나사 열변위 보정에 대하여, Mitsuyasu⁽²⁾등은 기계의 온도상승 예측량으로 보정 기능을 이용한

열변위 기능을 연구하였으며, Yamaguchi⁽³⁾는 볼 나사의 열팽창과 위치결정 정도의 영향에 대하여 연구^(4, 7)하였다. 그 외에도 볼 나사의 열팽창에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 볼나사 지지 베어링에 관한 연구는 아주 미흡한 상태이고, 생산현장의 실정에 따라 적용되고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 CNC 선반의 볼 나사 지지 베어링의 배열방식과 최적의 조합방법을 실험을 통해서 찾아보고 상용되는 공작기계에서 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 지지 베어링 배열 조합과 고정

공작기계 이송계의 지지 베어링부는 테이블 이송에 따른 볼나사 열팽창에 대한 지지 능력과 더불어 변형량을 극소화하여야 한다. 이는 안내면의 열변형 등 이송계 강성의 효과를 극대화하기 위해서이다. 앵글러 콘택트 볼 베어링(Angular contact ball bearing)은 구조적 특징으로 인해 단일 베어링으로는 축 방향 하중에 대해 한 방향밖에 지지할 수 없다. 따라서 앵글러 콘택트 볼 베어링은 두 개 이상을 조합하여 사용한다. 이송계 특성에 따라 조합 방법을 결정하는데 주로 조합된 베어링의 개수와 방향에 따라 Fig. 2.1과 같이 분류한다.

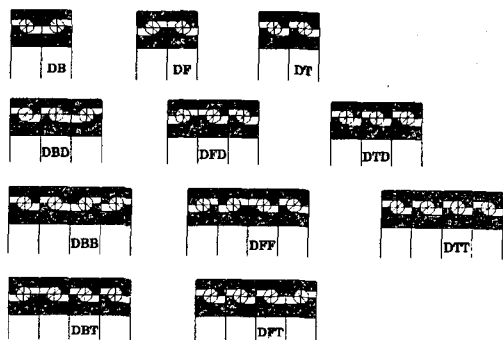


Fig. 2.1 Combined type of angular contact bearings

지지 베어링은 일반적으로 2개 이상의 베어링을 조합하고, 예압을 부여하여 사용하는데, 조합 방식에는 Fig. 2.1과 같이 2열, 3열, 4열 등이 사용되고, 베어링의 정면을 맞대어 조립한 정면 조합(DF, DFD, DFF, DFT), 배면 조합(DB, DBD, DBB, DBT), 병렬 조합(DT, DTD, DTT) 등이 있다. Fig. 2.2(a), (b)는 정면 조합과 배면 조합 시에 외륜과 내륜 사이의 볼과 접촉점 연장선이 나사 축의 중심선과 만나는 2개의 교차점 거리(D)를 나타내고 있다.

Fig. 2.2(a), (b)에서와 같이 축의 휨을 지지하는 능력이 크기 때문에 정면 조합의 조립 방법을 많이 적용되고 있다. Fig. 2.2(b)와 같이 정면 조합은 베어링 외륜의 원통도가 가공오차에 의해 편차가 발생될 경우 자동조심능력이 배면 조합에 비해 떨어지므로 가공에 의한 원통도 오차가 많은 경우에 나사축이 곱힘 응력을 받을 수 있다.

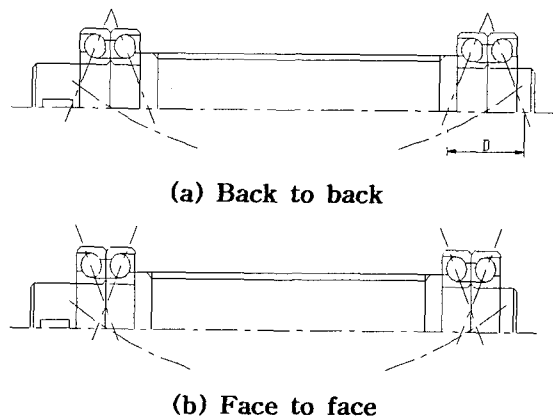


Fig. 2.2 Type of bearings on shaft

또한 볼나사의 예장력을 측정할 때 실팽창 뿐만 아니라 곱힘량도 고려하여야 하므로 팽창량을 정확히 규정할 수 없고, 지지 베어링은 축 방향으로 많은 힘을 받아 볼나사에 열팽창을 일으키고, 지지 베어링에 부하 하중이 증가하여 베어링의 수명을 단축시키고, 결국에는 베어링이 파손되는 원인이 된다.

따라서 기계 운전시 발생하는 열팽창이 볼나사의 신장량을 충분히 흡수할 수 있는 예장력을 부여할 수 없다. 만약 예장력을 부여 할 경우 베드와 컬럼 및 새들 등이 변형되어 기계의 정도에 영향을 주게 된다. 그러므로 지지 베어링에 적절한 예장력을 부여함은 중요하다.

Fig. 2.3은 가로축은 너트의 위치, 세로축은 베어링과 나사 축의 탄성 변위를 나타내었다. 너트의 위치 변화에 따른 고정-지지(fix-support), 고정-반고정(fix-semifix), 고정-고정(fix-fix)으로 구분하여 탄성 변위를 나타내고 있는데, 고정-지지의 경우 너트의 위치와 탄성 변위는 비례 관계에 있음을 알 수 있고, 고정-반고정의 경우 너트 위치 300mm에서는 탄성 변위가 미소한 변화를 나타내지만 300mm이상에서는 고정-지지의 경우와 같이 너트의 위치에 대해 탄성 변위가 비례 관계임을 알 수 있다. 그러나 고정-고정의 경우 너트의 위치와 관계없이 탄성 변위의 변화가 미세함을 알 수 있다.

그러므로 고정-지지(축 방향 자유)에서는 너트 위치에 의한 탄성 변위 변화가 크고, 고정-고정에는 강성이 높게 되고 변위도 감소된다.

따라서 고정-고정의 경우는 고정도화에는 유리하지만, 나사 축 열팽창에 의한 지지 베어링에 과부하가 발생하는 원인이 됨으로 고정-반고정 구조를 적용하고 있다.

2.2 나사축 구조의 영향

나사 축의 지지 구조를 고정-고정형으로 하면 온도는 상승해도 열변위는 탄성변위 범위를 유지하므로 고정도화에 유리하지만, 온도 상승에 비례된 하중이 지지 베어링에 이동되면, 나사축 베어링의 내구성이 문제가 야기되기도 하고 기계 본체를 변형시킬 가능성이 있다.

Fig. 2.4에서 ㉓㉔와 같은 선도의 경우, 온도 상승과 베어링에 추가되는 하중 관계는 정상적으로 나타내고 있는데, 고정-고정의 지지 구조에서 나사 축에 예장력을 부여하면, 조립부와

지지 베어링 사이에서는 나사 축이 수축 방향 하중이 가해지기 때문에 ㉓㉔㉕ 선도와 같이 평행이동을 하여, 온도 상승에 따른 베어링의 부하를 보상할 수 있다.

온도 상승이 큰 고정-고정 지지 구조가 아닌 경우, 고정-지지에서 지지축은 열변위에 대응하여 축 방향에 슬라이딩이 가능한 구조로 ㉓㉔㉖와 같은 선도로 표현할 수 있고, 베어링에는 온도 상승에 따른 하중은 추가되지 않지만, 나사 축의 열변위가 크게 된다. 이와 같은 경우에는 고정-반고정의 구조에서는 나사 축 예장력을

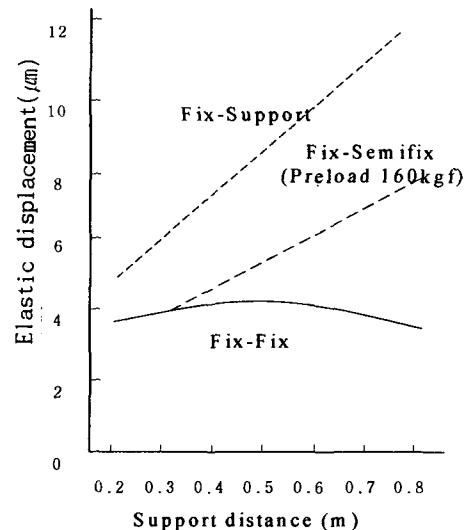


Fig. 2.3 Relation between elastic displacement and support distance

부여하는 대책으로 많이 사용되고 있는데, 반고정에서 예장력을 부여하는 지지 구조를 Fig. 2.5에 나타내었다. 반고정은 나사축 수축 방향을 고정, 팽창 방향에는 자유단이 되도록 하는 구조이고, 온도 상승은 축 방향 하중에 의해서 예장력이 부여될 때까지는 고정-고정과 동일한 조건이 되고, 그 이상에는 고정-지지와 같은 효과를 얻을 수 있고, ㉓㉔㉖와 같은 선도가 되는데, 열변위는 예장력에 상당하는 양만큼 감소하게 된다.

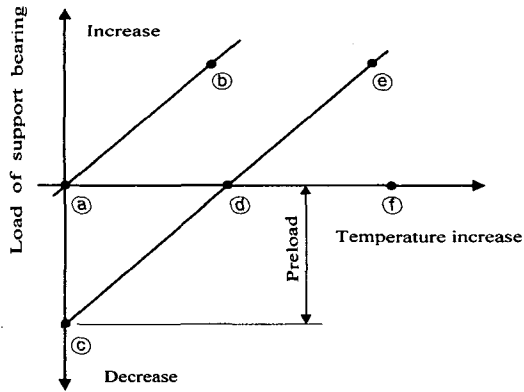


Fig. 2.4 Relation between load of support bearing and temperature increase

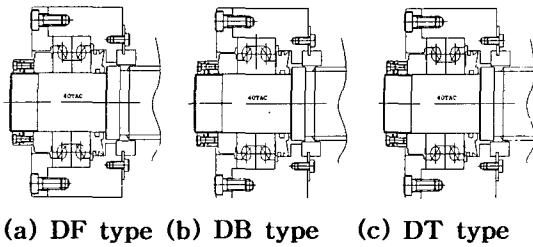


Fig. 2.5 Supporting fix-semi fix for DF, DB, DT type

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험기기 및 장치

열변위량에 따른 적절한 예장력을 고찰하고, TAC 볼베어링(Thrust angular contact ball bearing)의 최적 배열방법을 찾기 위한 실험장치는 Photo. 1에 나타내었다. 또한 고정 방식은 한 방향(좌측) 지지대는 완전 고정하고, 반대편(우측) 지지대는 베어링을 원활하게 배열 조합 방법에 따라 교체할 수 있도록 제작하였다.

본 연구에서는 Photo. 1과 같은 실험기기를 사용하여 베어링의 배열 조합 방법에 따른 볼나사의 열변위량을 측정하기 위하여 볼나사에 니

크롬 열선을 감아 볼나사의 온도변화를 유도하였다. 온도변화에 따른 열변위량을 측정하기 위하여 볼나사 우측 끝단에 볼을 부착하고, 센서의 흔들림을 방지하기 위해 마그네틱 블록을 이용한 고정용 지그로 겹 센서 장치를 플레이트에 고정하였다. 볼나사 표면 온도변화량 측정을 위하여 접촉식 표면 온도계를 이용하였다.

볼나사는 누적 대표 리드오차(E)가 $13\mu\text{m}$ 이고 변동 오차가 2π 당 $6\mu\text{m}$ 인 C3등급이며, 예장력을 부여하기 위해 인디게이터와 토크렌지를 사용하였다.

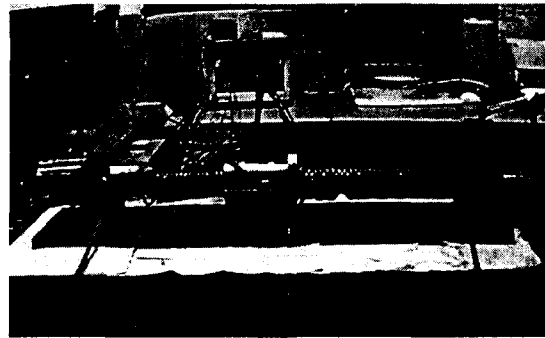


Photo.1 Schematic diagram of experimental apparatus

4. 실험결과 및 고찰

볼나사에 온도 변화에 따른 열변위량은 지지 베어링의 조합 방법 형식에 따라, 예장력을 부여하지 않는 경우와 예장력을 부여한 경우 자유 (free) 형, D 형, DT 형, DBD 형, DBT 형에 따른 열변위량을 측정된 결과들을 나타내었다.

지지 베어링 중 좌측 방향의 베어링은 고정시키고, 우측 방향의 지지 베어링은 자유단 상태로 하여 Fig. 4.1에 볼나사의 온도 변화에 따른 열변위량을 보인 결과를 나타냈다.

자유 형 조립 형식에서 가로측은 온도 변화량을, 세로측은 볼나사 열변위량을 나타내었다. 상온 20°C 로부터 볼나사의 온도 상승에 따른 변위량이 증가하고 있음을 알 수 있고, 볼나사의 표

면 온도를 43℃까지 올렸을 때, 열변위량은 190 μm 정도임을 알 수 있었다.

3차이론 변위값과 실제 측정된 온도에 따른 변위값을 Fig. 4.1에서 비교해 보면 이론 변위량이 감소되고 있는데, 이는 볼나사의 온도가 볼나사에 전체적으로 상승되지 않고, 볼나사 끝단부의 온도상승량 차이로 생각된다.

볼나사 축 방향 강성은 60kg/μm이고, 베어링 지지점 간격 거리는 800mm, 축경은 Ø32mm의 경우, 온도 상승에 따른 열변위 오차량을 최소화하기 위해 설계한 트렌드 리모벌(Trend Removal)과정을 수행하고,

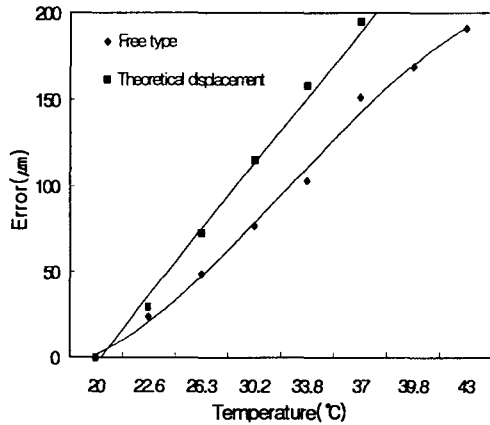


Fig. 4.1 Variation in temperature with error for experiment in the free type

베어링의 조립 형식과 예상력에 따른 변위량을 측정된 값을 Fig. 4.2, Fig. 4.3, Fig. 4.4 및 Fig. 4.5에 나타내었다.

Fig. 4.2의 D 형에서는 예상력 800kg을 주었을 때, 40℃에서 100μm, 예상력을 가하지 않았을 때는 150μm 변화되었고, Fig. 4.3의 DT 형에서는 예상력을 가했을 때 18μm, 예상력이 없을 때는 70μm로 변화되어 예상력에 의한 효과로 52μm의 변위 오차량이 감소됨을 알 수 있었다. Fig. 4.4의 DBD 형에서는 예상력을 주었을 경우 1.5 μm 변화되었고, 예상력을 가하지 않았을 때는

13μm 변화되었음을 알 수 있었다. 이때 변위 오차량은 11.5μm이 감소되었다.

Fig. 4.5와 같이 DBT 형으로 배열하였을 경우 예상력을 가했을 때는 2μm, 예상력을 가하지 않았을 때는 9μm의 열변위량을 보이고, 변위 오차량의 감소는 7μm를 보였다.

또한 온도에 따른 예상력이 주어졌을 때와 예상력이 주어지지 않았을 때, 열변위량에 따른 베어링 배열 방법을 비교하기 위해 실험치에서 얻어진 구간별 온도 변화와 변위값은 최소자승법을 이용하여 수식을 구하였다.

Fig. 4.3의 DT 형인 경우 예상력을 주었을 때 결과식(4.1)과 예상력을 주지 않았을 경우 결과식(4.2)을 얻을 수 있다.

$$Y = 0.92X - 16.3 \quad (4.1)$$

$$Y = 3.08X - 52.25 \quad (4.2)$$

여기서 Y : 변위 오차량(μm)

X : 온도 변화량(℃)

결과식 (4.1), (4.2)를 Fig.4.3에 은선으로 표시하였다.

식(4.1)에서 예상력을 주었을 경우 임의의 지점에서 온도차(1℃)에 대한 변위 오차량은 0.92μm이었으나, 식(4.2)에서 예상력을 주지 않았을 때는 3.08μm였다. 그러므로 예상력을 주었을 때와 주지 않았을 때를 비교해 보면 2.16μm의 변위 오차량이 발생한 것이다.

Fig. 4.4의 DBD 형에서는 예상력을 주었을 때의 결과식(4.3)과 예상력을 주지 않았을 때의 결과식(4.4)을 얻을 수 있다.

$$Y = 0.07X - 0.69 \quad (4.3)$$

$$Y = 0.52X - 9.73 \quad (4.4)$$

결과식 (4.3), (4.4)를 Fig.4.4에 은선으로 표시하였다.

식 (4.3)으로부터 임의의 지점에서 온도차(1℃)에 대한 변위 오차량은 0.07μm이고, 식(4.4)로부터 변위 오차량은 0.52μm이 됨을 알 수 있었다. 그러므로 예상력을 주었을 때 0.45μm 변위

편차량이 발생됨을 알 수 있다.

이상의 실험 결과로부터 800kg의 예장력을 주었을 때와 주지 않았을 때, DT 형은 52 μm 오차량 차가 있었고 DBD 형에서는 11.5 μm 오차량 차가 있었으며, 1 $^{\circ}\text{C}$ 온도 변화에 따른 변위 오차량으로부터, DT 형에서 0.92 μm 으로 DBD 형에서 0.07 μm 으로 안정화됨을 알고 예장력의 효과를 확인할 수 있었다.

그러나 볼나사의 지지 베어링의 선정에서 원가를 고려해 가장 적절한 형식을 선택해야 하고, 예장력을 무리하게 추가하는 경우, 지지 베어링 파손 및 수명에 영향을 줄 수 있으므로 예장력 부가는 볼나사의 길이와 비례한 1~2 $^{\circ}\text{C}$ 범위에서 가하는 것이 필요하다.

Fig. 4.6과 Fig. 4.7은 실험 결과를 검토하기 위해 현재 상용되고 있는 CNC 선반에서 Fig. 4.6과 같이 지지 베어링 1열 구조로써 예장력이 225kgf 부여된 D 형과 Fig. 4.7와 같이 2열 구조로써 예장력은 500kgf가 부여된 DF 형의 지지 베어링에서 실험을 통한 검토를 하였다.

실험 결과 Fig. 4.6과 같이 D 형에서 20 μm , Fig. 4.7과 같이 DF 형에서 12 μm 로 측정되었다. Fig. 4.6과 Fig. 4.7에서 알 수 있듯이 D 형보다 DF 형의 지지 구조에서 예장력 부여에 따른 효과를 확인할 수 있었다.

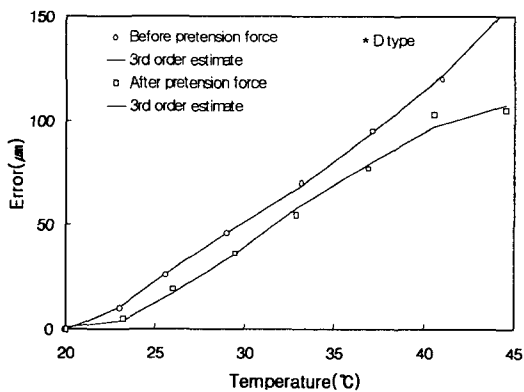


Fig. 4.2 Variation in temperature with error for experiment in the D type.

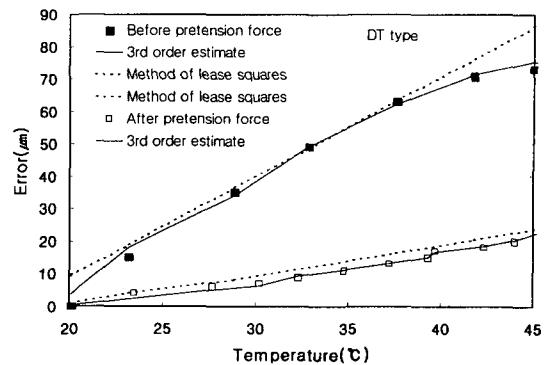


Fig. 4.3 Variation in temperature with error for experiment in the DT type.

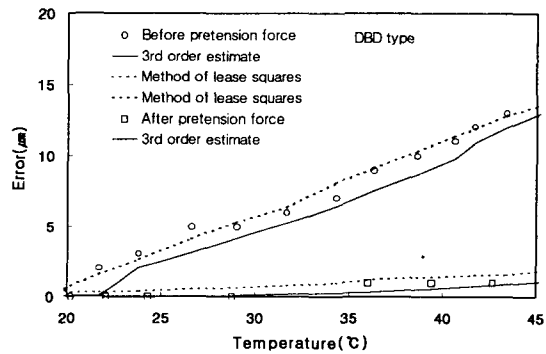


Fig. 4.4 Variation in temperature with error for experiment in the DBD type.

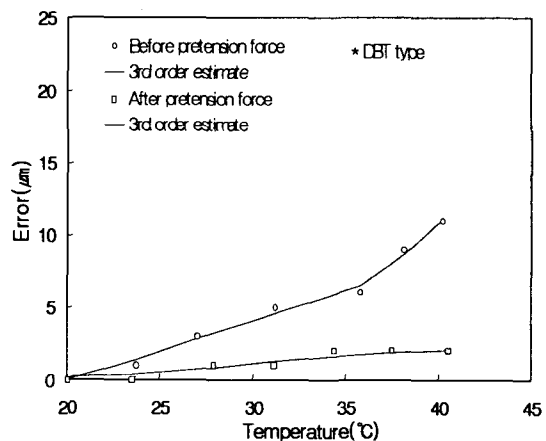


Fig. 4.5 Variation in temperature with error for experiment in the DBT type.

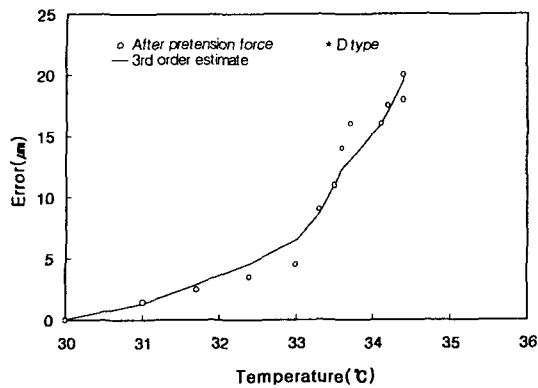


Fig. 4.6 Relation between temperature and error for experiment in the D type.

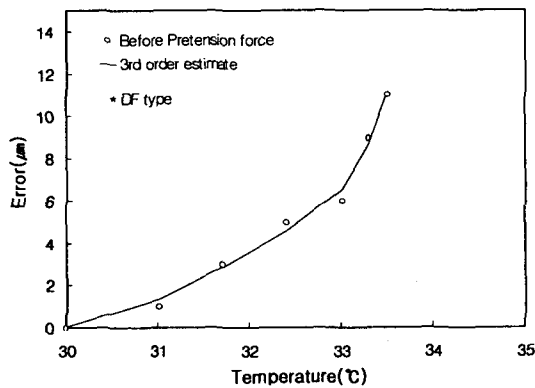


Fig 4.7 Relation between temperature and error for experiment in the DF type.

5. 결론

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

- 1) 지지베어링의 조합방법에 따른 영향과 예상력의 효과를 확인할 수 있었고 위치결정 오차량을 억제하기 위해 적절한 조합방법과 예상력 부가가 필요함을 알 수 있었다.
- 2) 볼나사의 베어링 지지 조합방법에서 자유형 베어링 조합의 경우 열변위량이 190 μ m를 나타냈고, DBD 형 베어링 조합의 경우 열변위량은 13 μ m로 177 μ m정도 열변위량 억제 효과를 얻을 수 있었다.

과를 얻을 수 있었다.

- 3) DBD 형의 베어링 지지 조합방법에서 예상력을 주지 않았을 경우 13 μ m이었는데 예상력을 주었을 때 3 μ m로 10 μ m정도 억제 효과를 얻을 수 있었다. 또한 실험 결과값으로부터 최소자승법에 의한 결과식은 예상력을 주었을 때 $Y=0.07X-0.69$, 예상력을 주지 않았을 때 $Y=0.52X-9.73$ 을 얻었다.

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策", 応用機械工學, No. 4, pp. 98 - 103, 1987.
- (7) 홍성오, 조규재, 김재열, "CNC 선반에서 볼나사 열변형에 따른 위치결정 정도 개선에 관한 연구", 한국공작기계학회지. 제8권, 제1호, pp.45-51,