

고속 회전시 주축 선단 돌출량의 이론적 분석 Theoretical Analysis of Axial Spindle Nose Movement at High Speed

*이찬홍¹

*Chan Hong Lee¹ (chlee@kimm.re.kr)

¹한국기계연구원 초정밀기계연구실

Key words : Axial Spindle Movement, Bearing Contact Angle, Centrifugal Force, High Speed Spindle

1. 서론

공작기계에서 주축의 역할은 고속 회전하는 공구나 공작물의 기하학적 위치를 정확히 한 점에 유지시키고, 다른 한편으로 주축 모터의 동력을 역으로 공구에 전달하는 것이다. 그래서 주축은 외부 하중과 진동에 강한 구조가 돼야 한다. 그런데 주축에서 전후부 지지 베어링이 고속으로 회전하면, 볼의 접촉각이 변화하면서 주축이 축 방향으로 돌출하는 현상이 발생한다⁽¹⁾. 이러한 축 움직임은 주축의 회전수에 따라 증가하고, 크기도 작지 않아 고속 가공기에서는 회전수에 따른 축방향 보정이 반드시 필요하다. 고속 베어링에서 볼 접촉각의 변화는 비선형 방정식에 의해서 수치 해석적으로 분석이 가능하나, 볼과 내륜의 동적 거동은 적당한 방법이 없어 계산이 어렵다. 그래서 축방향 돌출에 대한 원인분석은 아직 자세히 이루어지지 못했다. 본 논문에서는 앵글러 콘택트 볼 베어링이 고속으로 회전을 할 때, 내부에 있는 주축이 축 선단방향으로 돌출하는 현상을 파악하고, 그 원인을 볼의 원심력과 베어링 내륜의 팽창이라는 것을 규명하고 내륜의 동적 거동 궤적을 계산하고, 이로부터 주된 영향도를 분석하였다.

2. 공작기계 주축에서의 축 돌출 현상

공작기계의 고속 주축은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 전후부에 볼 베어링을 Tandem Type으로 배열하고, 후부 베어링 위에 베어링 예압장치를 설치하여 베어링에 무리한 열하중이 가해지지 않도록 구성되어 있다. 이 구조는 주축 선단에서의 절삭력에 유리한 배열이나, 주축이 선단 방향으로 이동할 경우는 억제할 수 있는 지지물이 없어 취약한 구조가 된다. Fig. 2에는 간략화된 주축구조와 내외부 하중을 표시하였다.

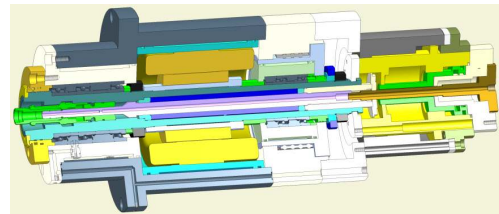


Fig. 1 Main spindle unit with supporting bearings

주축의 선단방향 돌출은 베어링 예압장치의 스프링에 의해서 약간 억제되기는 하지만 500 N 정도로는 축 돌출 현상을 막을 수 없다. Fig. 3에는 고속 회전시 주축 선단에서의 축 돌출 현상을 보이고 있다. 회전수를 계단 형태로 증가시킬 때마다 주축에 돌출량이 갑자기 증가하는 것을 알 수 있다.

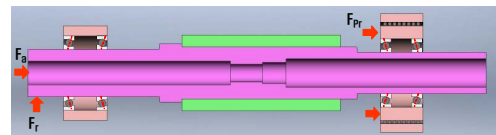


Fig. 2 Simplified spindle unit with front and rear bearings, cutting forces

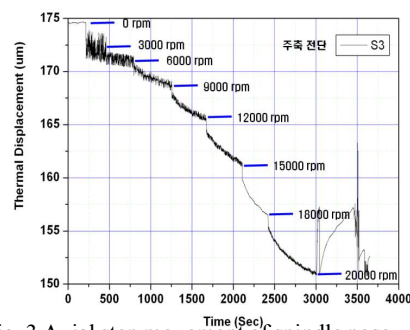


Fig. 3 Axial step movement of spindle nose with speed

베어링이 고속으로 회전하면 볼의 접촉각이 변화하는데, 외륜과의 접촉각은 작아지고, 내륜과의 접촉각은 커진다. 이것은 볼이 고속 회전에 의해 원심력이 증가하여 외륜 레이스의 끝단까지 밀려가기 때문이다. 이때 볼은 내륜과 접촉할 때 초기 각도보다 크게 되어 내륜의 상단부와 접촉한다. 이러한 현상을 Fig. 4에 표시하였다. 이때 내륜이 축방향으로 돌출되는지 분석하였다.

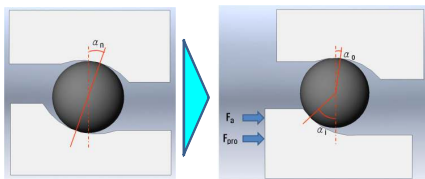


Fig. 4 Change of ball contact angle at high speed

볼과 내륜의 동적 거동은 Motion S/W에 적절한 구조조건을 주어서, 볼이 수직으로 이동하게 만들어 고속 베어링을 시뮬레이션 할 수 있다(Fig. 5). 볼의 직경이 10 mm, 내외륜의 곡률이 13 mm로 가정하였다. 볼이 수직 방향으로 상승할수록 내륜과의 접촉각은 증가하는 것으로 나타났다.

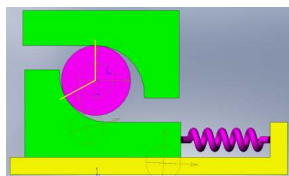


Fig. 5 Ball movement due to centrifugal force

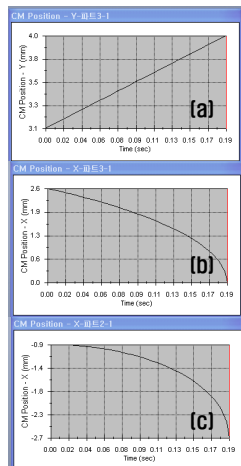


Fig. 6 Axial inner race movement due to ball

Fig. 6(a)-(c)으로부터 볼을 약 1mm 정도 수직 상승시키면, 볼은 축 선단방향으로 2.6 mm 이동하였고, 내륜은 선단방향으로 1.6 mm 이동하였다.

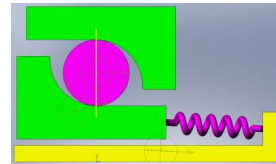


Fig. 7 Inner race movement due to centrifugal force

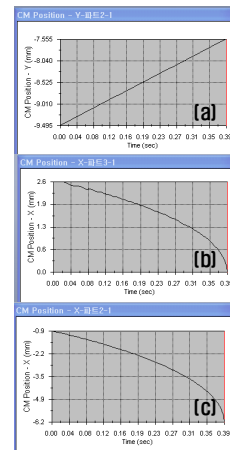


Fig. 8 Axial inner race movement due to inner race

Fig. 7과 8에서 베어링의 내륜이 고속 회전시 원심력과 열변위로 인해서 내륜이 팽창한다면, 축 방향 돌출에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 내륜이 반경방향으로 2 mm 정도 팽창하면, 내륜의 축 선단방향으로 5.3 mm 이동하였다.

4. 결론

1. 고속 주축의 축 선단방향 돌출은 볼의 원심력에 의한 접촉각 변화와 내륜의 원심력과 열변형에 의한 내륜 팽창의 결과이다
2. 주축의 축 돌출량에 대한 기여율은 내륜의 원심력 및 열변위에 의한 팽창이 볼 접촉각 영향보다 약 2배 정도 크다.

참고문헌

1. J. Jedrzejewski, W. Kwasny, "Modelling of angular contact ball bearings and axial displacements for high speed spindles," Annals of the CIRP, 59, 2010.