

주축베어링의 비대칭 발열이 열변형에 미치는 영향

Effects of Spindle Bearing's nonsymmetric Heat Generation on Thermal Deformation of Headstock

이 찬 홍*, 이 후 상*

* 한국기계연구원 공작기계그룹

Lee, Chan-hong Lee, Hu-sang

KIMM, Machine Tools Lab.

1. 서론

요사이 공작기계는 고생산성을 위해 고속절삭과 강력 절삭이 가능하도록 설계되고, 고성능의 Controller를 부착하여 이송과 공구착탈에 필요한 비절삭 시간을 급격히 단축시켜 나가고 있다. 여기서 기본적으로 만족해야 하는 전제조건은 기계성능, 즉 절삭능력과 가공정밀도의 신뢰성을 유지하는 것이다. 그러나 주축의 경우에는 고속운전과 과부하로 인해 발열이 심하게 발생해서 주축의 열변형은 물론 주변 구조물에도 열적 영향을 미쳐 장시간의 운전조건하에서는 공작기계 전체가 열변형을 하게 된다. 또한, 설계당시에 열적인 안정성을 위해 구조물의 형태를 대칭적으로 설계하지만 절삭력을 받는 상태에서 각 부품의 비대칭 발열이 비대칭 열변형을 야기시켜 가공정밀도를 유지하는데 어려움이 있다. 특히 주축베어링은 공작기계내에서 발생하는 모든 절삭력을 지지해야 하고 회전해야 하기 때문에 비대칭 발열이 심하게 일어난다. 그래서 주축의 열거동을 정확히 파악하고 상응한 보정을 위해 베어링의 비대칭 발열이 주축대에 어떤 영향을 미치는지 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 공작기계 주축베어링의 비대칭 발열의 원인과 발열형태를 이론적으로 예측하고, 실험에 의해 비대칭 발열과 냉각특성을 운전조건 별로 확인하였다. 또한 비대칭 발열이 주축대의 열변형에 어떤 영향을 미치는지 알기 위해 유한요소법에 의해 열변위 특성을 분석하였다.

2. 절삭력 하에서 주축베어링 내의 하중 및 발열량 분포

주축베어링 내에서의 발열은 베어링의 작동조건에 따라 크게 차이가 나는데, 주로 영향을 미치는 파라미터로는 베어링의 예하중, 마찰계수, 윤활유의 종류, 회전속도, 볼과 내·외륜의 조립상태 등이 있다. 특히 베어링의 예하중은 베어링의 초기 발열특성을 크게 좌우하는 파라미터로서 주축의 열특성을 안정시키기 위해 주축의 상용운

전조건에 알맞는 예하중 결정이 필요하고, 절삭력에 대한 주축의 정·동강성을 결정 짓는 요소로서 열적은 물론 정·동적 특성을 고려한 예하중 결정이 요구된다. 일반적으로 주축의 열변형을 안정화시키기 위해 주축을 일정속도로 회전시키게 되는데 이때 전술한 영향인자들은 다소변동은 있지만 전반적으로 각 인자의 고유치를 유지한다. 베어링의 예하중 역시 정지상태의 예하중보다는 작거나 커지는 경향은 있지만 주변의 온도에 따라 일정한 값을 유지한다.

예압으로 인한 발열은 주로 베어링 볼의 미끄럼에 의해 생겨나는데 예압이 커질수록 마찰계수와와의 관계에 의해 발열이 비례적으로 커진다. 수식적으로 표시하면 다음과 같다.

$$H = \alpha \cdot \mu \cdot n \cdot d_m \cdot f(F_a + F_r) \quad \text{-----(1)}$$

α : 비례상수 d_m : 회전지름
 μ : 마찰계수 F_a, F_r : 축하중, 반경방향하중
 n : 축의회전수

즉, 무부하 상태에서 예압만 받고 있는 베어링에서의 발열은 그림1-(a)와 같이 베어링 전체에 균일하게 발열된다. 그러나 주축의 구조적 특성상 절삭력을 반경방향으로 받으므로 주축베어링에서는 반경방향의 하중이 주로 작용된다.

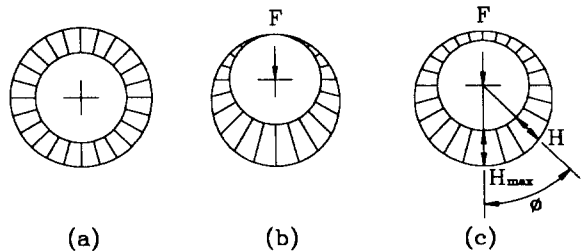


그림 1: Load and Heat generation Distribution of Spindle Bearing

즉 예하중과 반경방향 하중의 부하율에 따라 그림 1-(b), (c)와 같이 하중이 분포되고 발열도 유사한 형태로 일어날 것이 예상된다. 그림1에서 나타내듯이 반경방향의 하중이 작용하는 선상에 최대 발열점과 최소발열점이 존재한다. 각 위치에서의 발열량은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$H = H_{max} \left[1 - \frac{1}{2\epsilon} (1 - \cos \phi) \right]^{1.5} \quad \text{---(2)}$$

H_{max} : 최대 발열량 ϵ : 부하율
 ϕ : 중심에서 부터의 각도

3. 주축베어링에서의 비대칭 발열 및 냉각 특성

선반과 같은 공작기계는 절삭력의 방향이 거의 일정해서 전절에서 서술한 바와 같이 주축베어링에 걸리는 하중분포가 편심이 되고, 강력절삭을 요구하는 절삭조건에서는 주축의 비대칭 발열이 심화될 것으로 예상된다. 또한 장시간의 가공을 요구하는 금형가공용 밀링 머신이나 연삭기도 비슷한 작동조건이 되고, 대량생산을 위한 머시닝센터의 경우도 절삭력의 방향이 단속적으로 지속된다. 그래서 이러한 일정한 절삭력 방향 하에서의 베어링 발열이 전절에서 예상한 바와같이 일어나는지를 밝히기 위해 발열실험을 실시하였다. 그림2에는 베어링에 예하중을 가하기 위해 중력을 이용한 예하중 40kg를 사용하였고, 반경방향의 하중(1번 방향)을 가하기 위해 나사와 Load Cell를 이용하여 200N을 가하였다.

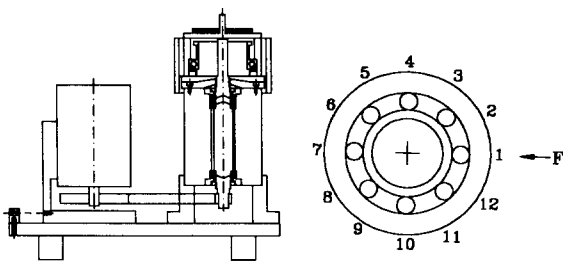


그림2 : Bearing Heating Unit

베어링은 FAG Angular Contact Ball Bearing (B7012, $\alpha = 15^\circ$)을 선택했고 윤활방식은 Grease (FAG L74V)를 사용했다. 베어링을 회전시키면서 발열량을 직접 측정하는 것은 매우 어려우므로 간접적으로 발열량을 평가하기 위해서 베어링의 외륜온도를 원주방향으로 30° 간

격으로 12개의 Thermocouple로 측정하였다. 측정 온도 데이터는 PC를 통해 수집되고 처리하였다. 베어링의 회전속도는 7000rpm으로 Inverter를 이용해 Motor를 무단 변속하였다.

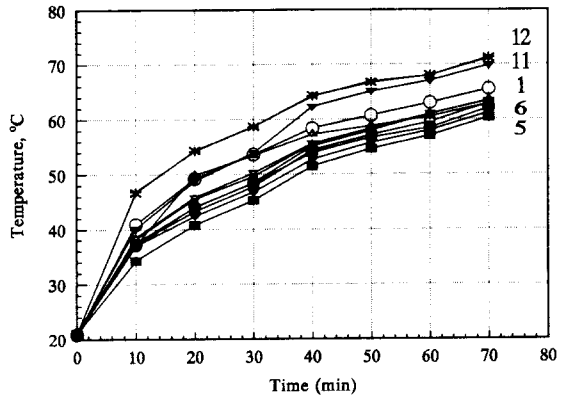


그림3 : Temperature distribution of Bearing Outer ring (Grease Lubrication)

상기에 나타낸 작동조건하에서 베어링의 외륜온도를 측정 한 결과가 그림3과 같이 나타났다. 그림에서 보듯이 측정점 11, 12번이 70분 동안에 걸쳐 계속 최고 온도를 유지하고 있고, 회전시작 10분까지는 급격하게 온도가 증가하고 60분부터는 온도증가폭이 점차 작아져서 온도 안정기로 들어 감을 알 수 있다. 그리고 측정점 12번은 10분 이후로 다른 측정점에 대해 약 10°C 정도의 차이를 가지고 계속 증가하고 있다. 각 측정점 간의 온도비교를 좀더 정확히 하기 위해 극좌표로 $t=10\text{min}$ 때와 $t=70\text{min}$ 일 때의 온도분포를 그림 4에 나타내었다.

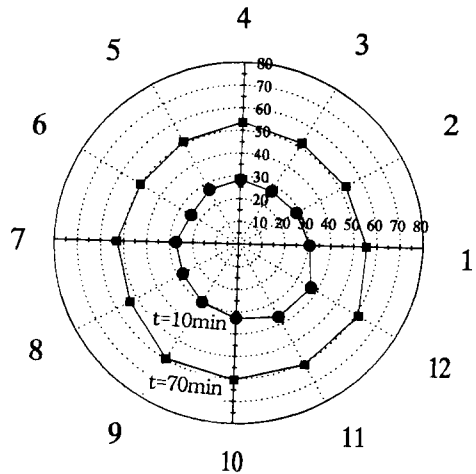


그림4 : Temperature Rise of Bearing outer ring (t=10min, t=70min, Grease Lubrication)

온도분포의 형태는 타원형으로서 10분일 때와 70분일 때의 형태가 닮은 꼴로 진행되었고, 온도의 최대, 최소값 위치가 서로 대각선 방향을 이루고 있다. 여기서 특이한 것은 진절에서 예상된 반경방향의 하중이 가해지는 위치에서 온도의 최대 최소값이 존재하지 않고 약 45° 정도 회전이동된 곳(11,12번 위치)에서 온도의 최대·최소차가 약 10℃ 정도 나타나고 있다. 이것은 윤활유로 사용되는 Grease가 베어링 내에서 일정한 유막을 형성하지 못하고 특정위치에서 Grease의 교반작용이 심하게 일어나기 때문으로 생각된다. 즉 1번 위치에서 반경방향의 하중이 가해져서 유막의 두께가 특별히 얇아져야 하기 때문에 11,12번 위치에서 윤활마찰이 심하게 일어나면서 유막이 강제로 얇아지기 때문이라 생각된다. 본 실험에서 사용된 작동조건하에서는 윤활마찰로 인한 발열효과가 반경방향의 하중에 의한 발열효과보다 큰 것으로 나타나고 있다. 윤활유의 점도가 비대칭 발열에 미치는 영향을 알기 위해 동일 종류의 베어링에 Grease에 비해 점도가 매우 낮은 점도 C10인 오일을 미소량 주입하고 같은 작동조건으로 실험을 하였다. 그림5에는 점도가 낮은 Oil 윤활로 인해 높은 온도의 위치가 F의 위치에 근접해서 분포해 있는 것을 알 수 있다. 이것으로 오일의 교반작용으로 인한 윤활마찰이 적어져 F의 영향이 점차 커져서 Grease 때보다 최고온도가 F에 근접해서 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 종류의 발열은 윤활유의 점도에 관계없이 반경방향의 하중에 따른 2차적 효과인 만큼, 절삭력의 방향이 주축대에서 비대칭 발열을 일으키는 주된 요인임을 확인하였다.

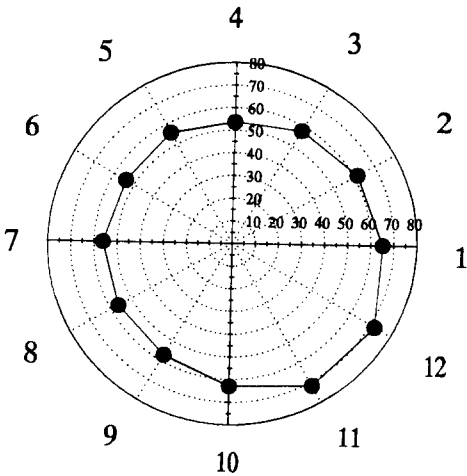


그림 5 : Temperature distribution of Bearing outer ring (t=70min ; Small oil Lubrication)

일반적으로 공작기계에서 가공을 할 경우 가공물을 연속적으로 가공하지 않고 각 가공공정의 특성 때문에 주축의 회전을 중단하고 공구를 교환한다거나 다음 공작물을 위해 대기상태에 있을 수도 있고, 동일 공작물 내에서 다른 위치의 가공을 위해 무부하로 동일 회전수를 취하면서 주축이 이동된다. 그러므로 상기의 작동조건은 특별한 절삭조건에서만 적용되므로 일반조건에 대한 현상을 알기위해 베어링 부위의 냉각특성에 대해 실험을 하였다. 우선 주축이 정지하였을 경우 냉각특성을 알기 위해 20분간 3000rpm으로 상기의 조건에 맞추어 발열시키고 주축을 정지하여 냉각시키면서 12개 측정점간의 온도 평형상태를 관찰하였다. 그림6에서와 같이 초기에는 최고와 최저온도차가 5℃ 정도 났으나 5분 뒤의 온도차는 절대온도가 31℃ 부근에서 상대적으로 1.7℃ 정도 차이를 나타내고 있다. 이것으로 주축의 온도 평형상태는 10분 경과후 각 위치에서 온도차이가 1℃ 정도로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

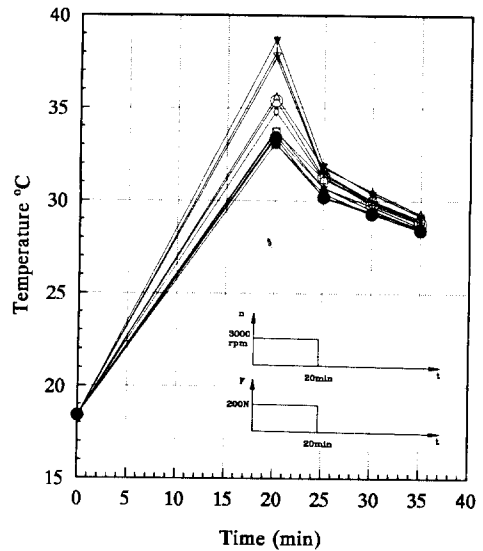


그림 6 : Cooling Characteristics of Spindle Bearing at 0 rpm

그림7에는 20분 뒤 주축에 무부하상태로 동일 회전수인 3000rpm으로 회전시켰을 때 주축베어링의 냉각특성을 나타내었다. 그림에서 보듯이 5분 경과 뒤 최고온도는 약 3.7℃가량 낮아졌지만 전반적인 각 점에서의 온도차는 3℃를 계속 유지하고 있다. 이것은 주축이 계속 회전하면서 각 점에 같은 양의 발열을 야기시켜 온도차를 계속 유지하기 때문이라 생각할 수 있다. 그래서 3000rpm 회전시에는 3℃ 정도의 온도차가 15분 정도는 유지하는 것으로 나타났다.

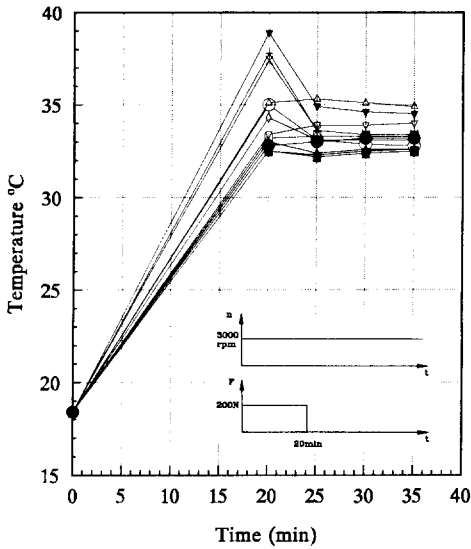


그림 7 : Cooling Characteristics of Spindle Bearing at 3000 rpm

좀더 절삭조건에 근사하게 실험을 실행하고자 회전속도는 계속 3000rpm으로 유지시키고 F는 10분간씩 단속적으로 가하였다. 그림8에 나타낸 바와 같이 베어링의 외륜온도는 각 측정위치에서 지속적으로 상승하고 있고 상대적인 온도차는 3~8°C 정도를 계속 유지하고 있다. 그리고 베어링의 온도가 높아질수록 F가 없는 상태에서는 전반적인 온도강하가 커진다. 전체적으로 보아 베어링 외륜의 온도차이는 주축하우징에 영향을 크게 미치게 되고 구조형태에 따라서는 주축하우징에서 열충격 현상이 일어날 것으로 생각된다.

4. 주축대에서의 열변위 특성

주축대에서의 열변위는 베어링의 외륜온도에 비례해서 변화하기 때문에 앞에서의 실험을 토대로 외륜온도차를 평균적으로 10°C 정도로 가정하였다. 대상 주축은 상용선반 주축대를 선택하여 FEM에 의해서 열변위에 대한 계산을 하였다. 우선 전·후부에서의 발열량 차이는 기본적으로 베어링 예압에 의해서 결정이 되고 추가적으로 절삭력으로 인한 각 베어링의 지지하중 차이에 의해 생겨난다. 그림9에는 절삭력을 지지하는 베어링에서의 하중차이를 수식적으로 나타내었다.

만약 a=160mm, b 280mm인 주축에서는 $R_a/R_b=2.7$ 이 되어서 하중차에 따른 전·후부베어링의 발열량이 비례적으로 발생할 것이다. 베어링의 예압과의 관계에 따라서 그리고 상승온도를 고려하여 전·후부 베어링의 절삭력

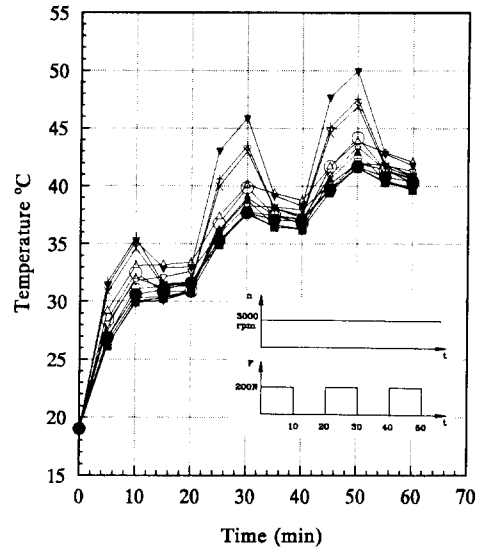
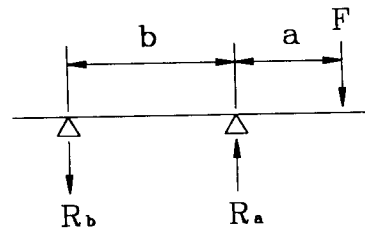


그림 8 : Cooling Characteristics of Spindle Bearing with discontinuity Radial Load



$$R_a = \frac{F(a+b)}{b} = F\left(\frac{a}{b} + 1\right)$$

$$R_b = F\frac{a}{b}$$

F : 절삭력

R_a, R_b : 전·후부 베어링의 지지하중

그림 9 : Radial Load of Front and Rear Bearing

으로 인한 발열량 차이는 R_a/R_b 보다 작은 1.8배로 결정하였고 전·후부의 베어링의 크기 때문에 무부하 상태에서 각각 100W와 70W의 발열이 생기는 것으로 가정하였다.

절삭시작으로부터 60분후 주축대의 온도분포는 그림10과 같이 나타났다. 주축대의 전부베어링 부위가 비대칭적으로 가열되어서 X,Y방향으로 비대칭 열변형이 일어나고 있다. (그림11)

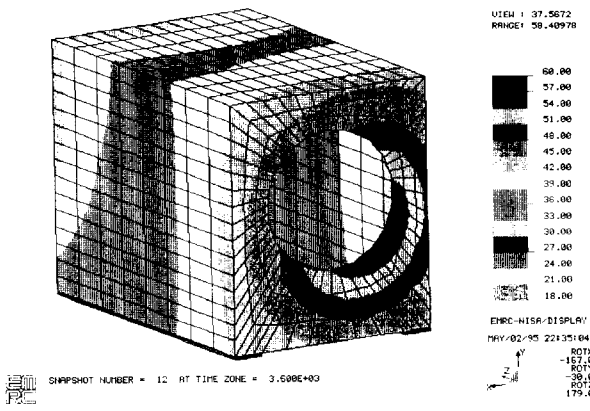


그림 10 : Temperature distribution of Headstock(t=60min)

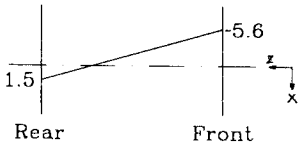
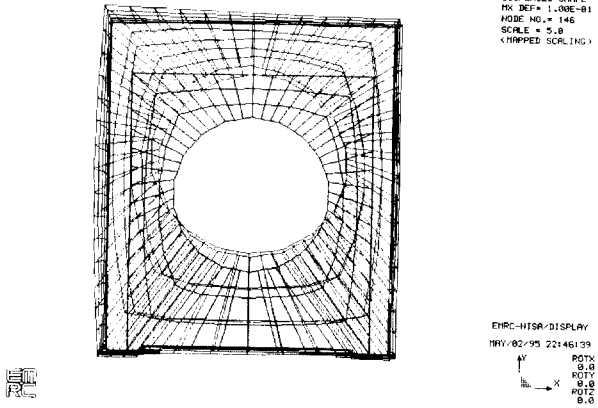


그림 11 : Thermal Deformation of Headstock (t=60min)

그림11에서 보는 바와 같이 비대칭 열변형으로 전·후부베어링 하우징의 센터이동이 전부와 후부에서 각각 $-5.6\mu\text{m}$ 와 $1.5\mu\text{m}$ 정도 반경방향으로 이동하였다. 이 현상에 의해 가공물의 원통도는 크게 손상될 것으로 예상되고 고정밀 선반에서는 이런 현상을 주의해야 한다. 그리고 Y방향은 전·후부에서 이동은 있었으나 그 양이 무시할 정도로 작았다. 다만 중절삭 가공을 실시할 경우에는 위에서 가정한 조건보다 매우 큰 발열이 야기되므로 X와 Y방향으로 큰 원점이동이 있을 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 주축베어링의 비대칭 발열에 대한 이론적 예측을 하고 실험에 의해 비대칭 발열과 냉각특성을 확인하였다. 또한 비대칭 발열이 주축대의 열변형에 미치는 영향을 유한요소법에 의해 분석하였다.

- 1) 주축베어링은 베어링의 예하중과 절삭력의 비율에 따라 비대칭 발열의 위치와 크기가 결정된다.
- 2) 베어링 윤활유의 점도가 클수록 최대 발열위치가 절삭력을 받는 위치에서 멀어진다.
- 3) 비대칭 발열의 효과는 베어링 외륜에서 약 10°C 정도의 온도차를 가져오고 무부하상태로 주축이 계속 회전하면 냉각되어 약 3°C 정도의 온도차를 15분간 유지한다.
- 4) 베어링에서의 비대칭 발열은 주축대의 회전중심을 전부 $-5.6\mu\text{m}$ · 후부 $1.5\mu\text{m}$ 정도 이동시킨다.

참고문헌

- [1] Harris, A. : Rolling Bearing Analysis, John Wiley & Sons, 1966
- [2] 岡本 純三 : 轉がり軸受, 幸書房, 1981
- [3] 이찬홍, 이후상, 최대봉 : 고속 주축 Housing의 열거동 억제에 관한 연구, 한국정밀공학회 춘계학술대회, 1994. 11 pp613~616
- [4] Weck, M. : Werkzeugmaschinen Bd. 2, VDI-Verlag, 1992