

고속 주축 Housing의 열거동 억제에 관한 연구

이찬홍*, 이후상*, 최대봉*

* 한국기계연구원 공작기계그룹

1. 서 론

현재 가공시스템은 생산성 향상을 위해 다방면에 걸쳐 자동화가 시도되고 있고, 한 걸음 더 나아가서 무인화가 추구하고 있다. 이런 상황에서 자동화와 무인화의 효과를 극대화 하기 위해 가공공정의 고속화, 즉 주축시스템과 이송시스템의 고속화가 활발히 진행되고 있다. 고속가공의 특징으로는 비절삭 시간의 절약과 절삭시간의 단축을 들 수 있는데, 구조적으로도 큰 영향을 미쳐서 작은 절삭력의 발생으로 인해 구조물이 고강성화에서 저강성화로 변화되고 있다. 그래서 고속가공의 효과는 전체 구조물의 크기축소와 전체중량의 감소로 나타나고 있다. 이와같이 구조적인 면에서는 정적, 동적으로 유리한 점이 나타나고 있지만, 열적으로는 매우 불리하게 나타나고 있다. 그 이유는 고속화에 필수적으로 사용되는 베어링, 안내요소부품, 볼 스크류, 모터 등의 부품이 기존 기계에 사용되는 부품보다 매우 빠르게 운동해서 마찰에너지가 급격히 증가하기 때문이다. 결국 구조물의 주요부위를 가열함으로써 열변형 문제를 야기시켜, 공작기계의 각 요소들의 주어진 공간적 위치를 유지하지 못하고 NC보정으로도 제어하기 어려운 각변화가 지하게 된다. 이 열변위 문제는 정적이나 동적 변형에서 다루어지는 수 μm 와는 차원을 달리하여 수십 μm 에 달함으로써 공작기계의 정도 개선에 있어서 우선적으로 다루어 져야 할 문제로 등장하고 있다. 특히 고속주축의 경우에는 주축 베어링에서의 높은 발열량으로 인해서 주축의 축방향 열변위와 주축 Housing의 열변위가 발생하여 가공물의 형상정도를 크게 저해하고 있다. 여기서 주축의 열변위는 Z축에 대해서 대칭이어서 열변위에 대한 보정이 상대적으로 쉽지만, 주축 Housing의 열변위는 3차원적으로 변화하여서 보정이 매우 어렵고, 열변위의 크기가 시간에 따라 변화하기 때문에 초기 설계시에 구조적 치수 및 Housing의 체결에 세심한 고려가 요구된다.

본 연구에서는 고속주축 Housing의 열전달 경로를 관찰하고 열변위의 양상을 파악해서 전·후부 베어링의 열발생량 차이에서 오는 주축심의 각변위 억제대책을 제시하고, 주축 Housing의 조립용 기준핀을 Housing의 Z축방향 열변위가 최소가 되도록 위치를 결정하였다.

2. 고속 주축계의 열전달 경로

주축계는 회전수가 고속이건 저속이건 주된 발열원이 전·후부의 주축 베어링으로서 발생된 열이 주축대의 판을 따라 대부분 전도가 되고, 일부는 판에서 외부공기에 의한 대류를 통해 외부로 배출된다. 이 과정에서 판에 전도된 열을 주변으로 계속적으로 확산시키지 못할 경우 극부적인 열 축적상태가 발생하여 온도가 상승한다. 결국 주축로 만들어진 주축 Housing에서는 해당 선 팽창계수에 따라 열변형이 생겨난다. 이 열변형은 하중으로 변화시켜 생각해보면 ton단위 이상의 하중이 주위 부품에 작용하는 것과 같아 일반적인 구조물에서는 물론 고강성 구조물에서도 열변위의 영향을 피할 수는 없다. 더우기 고속 주축계에서는 베어링의 고속회전으로 인해서 열발생이 매우 심하게 일어나고, 회전속도의 변화가 클 경우 열충격 현상이 나타나 베어링을 파손시키기도 한다. 또한 약간의 비대칭 구조에서도 베어링에서의 열발생이 매우 큰 관계로 열변위의 비대칭성이 확대되어 나타난다. 그리고 주축 Housing에 있어서 좌우면은 일반적으로 기하학적 대칭을 이루고 있지만 상하에 있어서는 기능상 대칭관계를 성립시키기가 어렵고, 상하의 열전달 조건이 판이하게 달라서 상하면에 있어서는 열적으로 비대칭성이 뚜렷이 나타난다. 그러므로 주축 Housing 설계에 있어서는 열발생에 따른 전체 구조물의 온도분포를 면밀히 분석해야 한다. 열거동에 대한 상황을 실험에 의해서만 파악하는 데는 여러가지 어려움이 있으므로, 대상 주축 Housing을 FEM모델로 구성하고, 실험에서 온도분포를 시간에 대해 측정하여 FEM모델을 실제 조건에 근접하도록 관련 파라미터를

변화시켰다. 이렇게 함으로서 실제 Housing으로는 측정하기 어려운 부위의 열거동을 파악할 수 있고, 현재의 실험 주축계에서는 운전이 어려운 영역에서의 열거동을 규명할 수 있다.

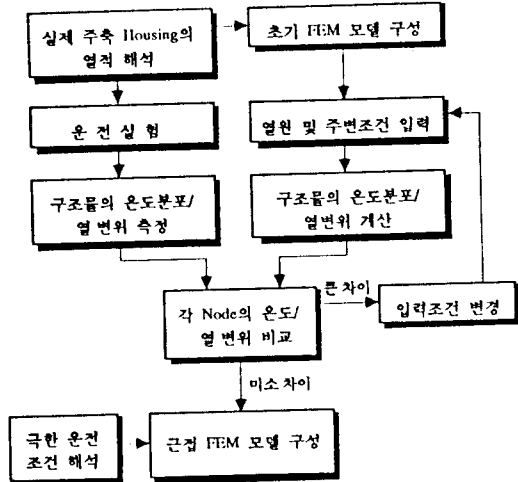


그림 1 : 실제 주변조건을 고려한 FEM모델구성

대상 주축 Housing은 고정밀 선반 주축 Housing으로서 $208 \times 245 \times 326 \text{mm}^3$ 의 체적을 갖고 있고 8,000rpm의 주축을 내부에 장착하였으며, 주축베어링은 복열 앵글러 콘택트 볼베어링 $\phi 80 \text{mm}$ 를 사용하였다. 여기서 실험에 의해 Housing 표면의 대류계수는 $1 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2 \cdot \text{K}$ 로 결정하였고 Housing의 밑면은 베드와 접촉되어 있는 관계로 관련 Node에 시간에 따른 온도변화를 설정하였다. 그리고 선반의 고속화 설계를 위해서 주축이 12000rpm으로 회전할 때 발열량을 기존의 연구자료^[11]를 토대로 전부베어링 부위에는 100W를 원주 Node에 분산하여 열을 공급하였고, 후부베어링에는 70W를 분산 공급하였다.

그림2에는 주축을 12000rpm으로 회전시키고 5분후에 주축 Housing의 온도분포를 계산한 결과이다. 그림에 나타내듯이 전부베어링 부위가 후부베어링 부위보다 열전도가 빠르게 중간부위로 이동하고 있고 전부에 있어서 Y축을 중심으로 좌우면의 온도분포가 대칭을 이루고 있지만 상하방향은 예상대로 비대칭을 이루고 있다. 또한 주축 Housing이 베드와 접촉하고 있어 하부의 열전도가 상부에 비해서 느리게 진행되고 있다. 그리고 전·후부 베어링에서 발생한 열은 그 크기에 비례해서 각 주축 Housing의 중앙쪽으로 전달되서 후부로부터 122mm지점에서 만나게 된다. 이것은 주축 Housing 중

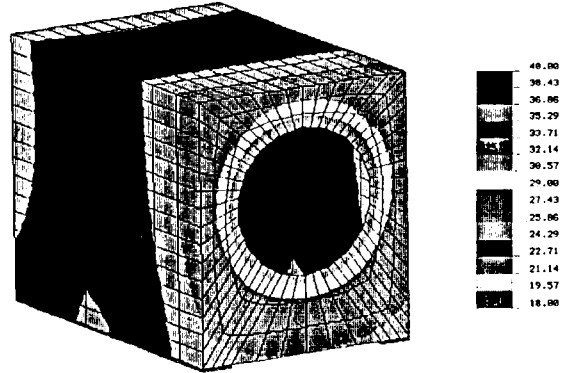


그림2 : 고속주축 Housing의 온도분포 (n=12000rpm, t = 5min뒤)

에서 가장 낮은 온도를 갖게 되는 면의 위치를 나타낸다. Housing의 전반적인 온도분포는 초기에 열발생과 열배출시 평형을 이루는 시간까지만 위치에 따라서 변화가 있고, 그 이후에는 시간에 따른 온도의 중분이 거의 일정하다.

3. 고속 주축 Housing의 열거동

주축 Housing의 X,Y방향 열변위는 베드면을 기준면으로 해서 평가하였다. 그리고 Z방향의 열변위는 어느 쪽에서도 기준점을 잡을 수 있으나 대상주축의 형태대로 후부베어링 쪽에 기준점을 두어 평가하도록 한다.

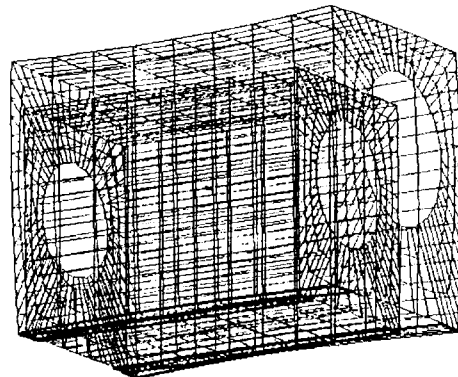


그림 3 : 고속주축 Housing의 열변형 (n=12,000rpm, t=1hr뒤)

그림3에 나타나듯이 전부베어링이 있는 전판이 큰 열팽창을 하였고 후판은 발열량에 비례하여 상대적으로 작게 팽창하였다. 전·후판의 열팽창 양상은 판 자체가 좌우대칭이라 열변형도 대칭적으로 변화하지만 동일한 비율로 팽하는 것이 아니라 베어링 구멍의 수평방향의 수직방향보다 많이 팽창하여 타원의 형태로 변화한다. 그림3에서는 수평방향의 열변위가 수직보다 약 3 μ m정도 더 팽창하였다. 이러한 현상은 베어링의 고속운전상태에 영향을 미치고, 경우에 따라서는 국부적인 예압증가 현상이 나타날 수 있다.

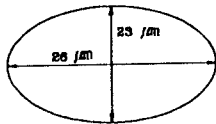
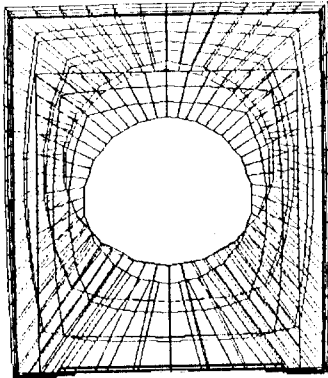


그림 4 : 전판에서의 열변위 양상

전후판의 상하방향 열변위는 하부가 상대적으로 작은 열변위가 생기고 상부는 온도가 높아서 좀 더 큰 열변위가 생긴다. 그래서 심한 발열이 일어나는 주축의 경우에는 극단적으로 표현하여 전·후판이 역 사다리꼴 모양의 열변위가 생겨난다. Z방향의 열변위는 실제로 주축 Housing을 베드와 체결한 4개의 볼트에 의해 어느 정도 저지되기는 하지만 열변위로 인한 열하중이 매우 크기 때문에 볼트에 의한 Z방향 변위는 크게 달라지지 않는다. 그러므로 각 볼트 자리에서는 Y방향만 고정음시키고 다른 방향은 이동가능하도록 조건을 주었다. Z방향의 열변위는 다른 방향보다 크기가 커서 48 μ m에 달하고, 직접 가공정밀도에 큰 영향을 미친다. 그러므로 발생된 Z방향의 열변위를 기하학적인 방법으로 보정할 필요가 있다(그림5).

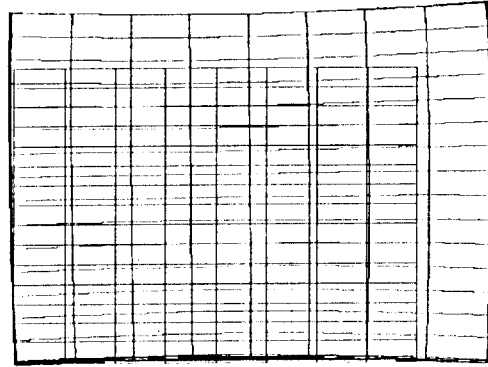


그림 5 : 주축 Housing의 Z방향 열변위

4. 열거동 억제를 위한 구조물의 두께 조정 및 기준핀의 위치 결정

주축 Housing에서는 모든 부분이 큰 열변위를 하지만 공작기계의 특성상 가공점에 영향을 미치는 방향은 Z방향과 축심의 각변위 방향이다. Z방향의 열변위는 부가적인 장치를 주축에 설치한다해도 불가피하게 생기는 변위이므로 열변위 보정을 하는 것이 더욱 유리하다. 선반의 경우에는 주축 Housing을 체결하는 4개의 볼트 외에 1개의 기준핀이 존재하는데 이것의 역할은 주축과 공구대가 충돌하였을 때 주축 Housing의 비틀림을 보정하기 위한 회전축 역할이다. 이 핀을 잘못 설치할 경우 그림3과 같이 주축 Housing에는 커다란 열변위가 생겨날 수 있고, 적절한 위치에 설치하면 생긴 열변위를 가공정밀도에 영향을 미치지 않도록 억제할 수 있다.

그림6에서 나타내듯이 a)의 경우에는 축심의 X, Z방향의 이동이 예상되서 가장 나쁜 위치가 되겠고, b)의 경우에는 Z방향의 열변위가 가공정밀도를 손상시켜 유리한 위치가 아니다. c)의 경우에는 축심의 이동이 전혀 없고 발생된 Z방향의 열변위를 후방으로 이동시킴으로써 가공정밀도에는 전혀 영향을 미치지 않는 적절한 위치 선택이 되겠다.

다음으로 축심의 각변위 변화는 NC의 정적오차 보정에 의해서도 보정될 수 없는 중요한 열변위 문제로서 본 연구에서 구조적인 방법을 제시하도록 한다. 각 변위의 억제대책을 설명하기 위해 전절에 나타난 주축 Housing의 열변위를 좀 더 간략하게 나타내면 단지 전판과 후판이 마주보고 있는 구조를 생각할 수 있다.

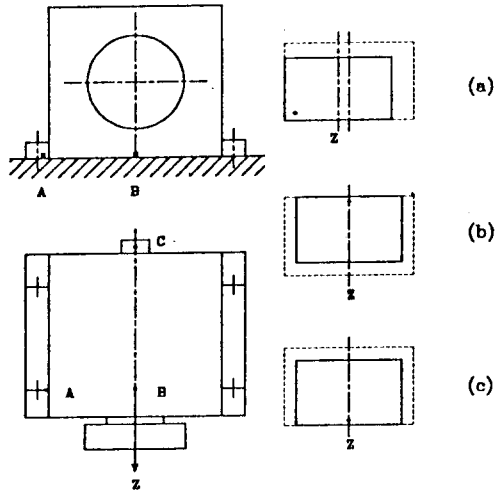


그림 6 : 기준핀의 설치위치에 따른 열변위의 영향 비교

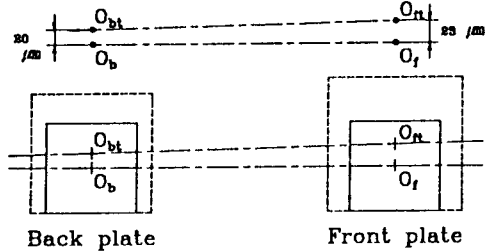


그림 7 : 전·후판의 열변위차에 의한 축심의 각변위 변화

그림3과 같은 경우에 전·후판의 축심 이동량은 Y방향으로 각각 $23\mu\text{m}$ 와 $20\mu\text{m}$ 로서 전후판의 축심위치가 $3\mu\text{m}$ 정도 다를수 알 수 있다(그림 7). 이 축심의 차이는 결국 발열량에 따른 온도 분포의 차이에서 원인을 찾을 수 있는데, 근본적으로 발열량은 사용 베어링의 크기와 주변조건에 따라 달라지므로, 베어링의 크기를 강제로 바꾸기 보다는 구조물의 조건을 바꾸어서 후판에서 작은 열발생에 따른 온도분포가 전판에서와 근사하게 되면 각변위를 억제할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots(1)$$

온도분포를 변화시키는 구조물의 열적 파라미터는 열용량 c 로서 주로 질량에 관계되기 때문에 전체 치수를 바꾸지 않으려면 질량을 증가하기 위해서 두께를 변화시키면 된다. 즉 발열량이 적은 곳에서 온도분포를 높게 올리려면 구조물의 두께를 얇게 하여 단위시간내에 축적되는 열이 많도록 한다.

전절에서 서술한 대상주축의 전·후부 베어링에서의 발열량이 100W와 70W인 점을 감안할때, 현재 Housing의 전·후판 두께인 30mm를 비례적으로 계산하여 후판만 21mm로 감소시키면 축심의 각 변위가 거의 없어진다.

5. 결 론

본 연구에서는 고속 주축 Housing의 열전달 경로를 관찰하고, 열변위의 양상을 파악해서 Z방향의 열변위 교정방법과 주축심의 각변위 교정방법을 제시하였다.

- 1) 실제 주축 Housing의 온도분포와 열변위를 측정하여 FEM모델의 주변조건을 추출하였음.
- 2) 선반 주축 Housing의 온도분포는 상하방향으로 큰 비대칭성이 나타나고, Z방향으로는 전·후부 베어링의 발열량에 비례한 위치에서 표면온도가 최소화됨.
- 3) 주축 Housing은 말의 안장 형태로 열변형하고 전·후판의 베어링 조립구멍은 열변위로 인해서 타원형태가 됨.
- 4) 기준핀을 전부 베어링 하부에 설치함으로써 Z방향의 열변위를 억제할 수 있음.
- 5) 축심의 각변위는 후판의 두께를 조정하여 억제할 수 있음.

참고문헌

- [1] K. Schubert, "Untersuchung des thermischen Verhaltens einer Schleifspindeleinheit", TU-Berlin, 1988.
- [2] Z. Paluncic, "Minimierung thermisch bedingter axialer Spindelverformungen", TU-Berlin Diss., 1990.
- [3] 이찬홍, "주축 및 안내면 구조의 고강성화 기술", 상자부 보고서, 1994.