

공작기계 주축구조의 고강성화 방법론 Methodology for high Stiffness Spindle Design in Machine Tools

*#이찬홍¹, 김창용²

*# C. H. Lee(chlee@kimm.re.kr)¹, C. Y. Kim²

¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부, ² ㈜화천기공

Key words : Machine Tools, High Stiffness Spindle Design, Methodology

1. 서론

세계 유수의 국제 공작기계 전시회는 차세대 공작기계의 형태와 사양에 대해서 점차 뚜렷한 설계방향을 제시하고 있다. 첨단 산업분야뿐만 아니라 대부분의 기계산업분야에서도 가공부품의 정밀도가 급격히 증가하면서 고속회전의 고정밀 가공을 요구하고 있고, 리니어 모터를 이용한 다축 고속 이송계로 일체형 고능률 가공이 가능한 장비를 원하고 있다. 특히나 고정밀 가공에서는 고속주축의 안정된 동력전달과 주축 선단의 기하학적 위치유지라는 기능적 역할이 매우 커서 과거로부터 현재까지 지속적인 연구대상이 되고 있다. 그래서 주축선단의 처짐이 최소가 되도록 주축을 최적화하는 연구가 많이 이루어 졌다. 최적화를 위한 일반적인 방법은 주축선단의 처짐을 목적함수로 하고, 주요 설계치수를 최적화 변수로 해서 최대, 최소 탐색 알고리즘을 사용하는 것이 대부분이다.

그러나 이 방법론은 주축의 각 설계변수 별 경향을 조망하지 못하고, 수치적으로 다차원 설계변수의 넓은 영역에서 상대적 최대, 최소점을 탐색하기 때문에 매번 중간점 근처에서 최대, 최소 점을 찾아야 하고, 또한 탐색되어진 최소, 최대가 전 영역에서 최대, 최소가 아닌 일부 영역에서만 최대, 최소 위치가 될 수도 있다. 그래서 이러한 수치적 탐색방법은 주축 설계자에게 선단 처짐을 최소화하는 설계변경의 방법론으로 충분하지 못하다.

그래서 본 논문에서는 공작기계 설계자가 주축의 사양에 따라 주축의 선단 처짐이 작아지는, 즉 선단강성을 최대한으로 하는 주축의 고강성화 방법론을 제시하였다.

2. 주축의 정동적 특성에 대한 설계변수 영향

주축 최적화를 위한 설계변수로는 주축 자체의 외경과 내경, 사용된 주축 베어링의 반경방향 강성과 전후부 베어링 강성간의 비율이 대부분 영향을 준다고 할 수 있다. 그리고 최적화의 목표는 주축선단의 정적, 동적 처짐이 최소화 되는 것과 주축의 1 차 고유진동수가 가능하면 높은 것이다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (1)$$

식(1)을 통하여 정동적 최적화의 방향을 개념적으로 살펴보면, 정적인 처짐은 주축구조 내 기하학적으로 조성된 k 와 F 사이에 하중 전달과정에서 처짐이 발생하는 것이므로 강성 k 를 강화시키면 목적을 달성할 수 있고, 1 차 고유진동수는 주축구조 내에서 m, c, k 의 안배에 따라 구조적으로 가장 약한 곳에서 진동이 생겨 1 차 고유진동수가 되므로 주축구조 내에서 약하다고 생각되는 곳을 강화시키면 1 차 고유진동수가 높아진다. 주축선단의 동적 처짐은 정적 처짐에 주축구조의 질량안배와 진동때문에 추가로 처짐이 생기면서 이것의 합이 되는 진동변위가 생기는 것이므로, 구조형태로 인한 질량안배의 불균형을 개선할 수 있다면 처짐이 감소하고 이 방법이 어렵다면 정적 처짐과 같이 k 를 고강성화 시키면 동적 처짐이 감소된다. 또한 주축에서 저주파수의 진동수일 경우 kx 의 값이 $m\ddot{x}$ 보다 훨씬 크기 때문에 질량으로 인한 처짐은 정적인 처짐에 비해서 매우 작다.

그래서 주축구조에서 주축선단을 중심으로 한 정적 강성 k 를 고강성화 하는 방향으로 설계변경을 한다면 정적 및 동적으로 처짐이 감소하게 된다.

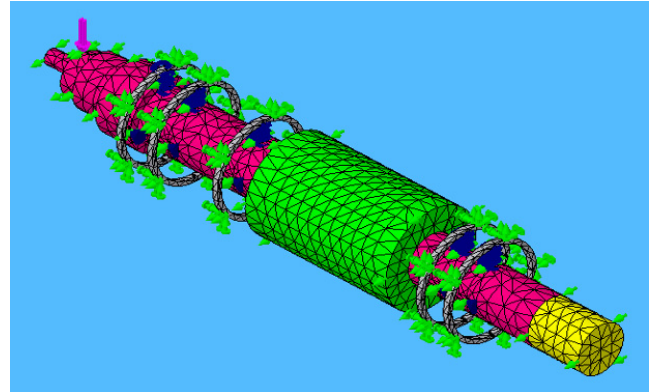


Fig. 1 High Speed Spindle Model with a built in Motor

3. 주축구조의 고강성화 방법론

주축의 고강성화 순서를 명확히 나타내기 위해서 그림 1 의 5 단 지지 주축을 2 단 지지 주축으로 근사적으로 변화시켜 예로 삼아 설명하도록 한다. 2 단 지지 주축의 사양은 표 1 과 같다. 그리고 네 가지 순서는 다음과 같다.

Table 1 Specification of simple Spindle with two Supporting Bearings

주축 전체길이	(mm)	547
주축 선단길이	(mm)	100
주축 외경	(mm)	40
주축 내경	(mm)	20
주축베어링 Span	(mm)	250
전부 베어링 강성	(N/um)	273*10 ⁶
후부 베어링 강성	(N/um)	162*10 ⁶

첫째, 주축의 베어링 Span 을 최적화함 : 표 1 에 나타난 주축에 베어링 Span 을 5~500mm 까지 변화시켜 보면, 주축선단의 처짐이 가장 적은 Span 이 존재함을 알 수 있다.

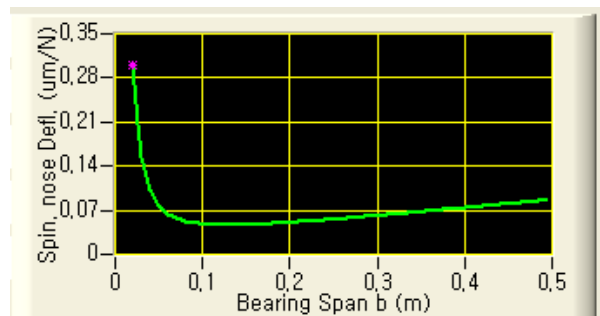


Fig. 2 Minimum Spindle Deflection with Bearing Span

주축의 외경이 40mm 일 때, 처짐량은 0.046 $\mu\text{m}/\text{N}$ 이 되고, 이때의 최적 베어링 Span 은 130mm 가 된다.

둘째, 주축의 외경을 증가시키면 : 허용이 된다면 주축의 외경을 증가시키면 주축선단의 처짐이 급격히 감소한다. 그림 3(a)은 주축의 외경을 변화시킬 때 최적 베어링 Span 을 나타낸 것으로 외경이 증가할수록 최적 Span 도 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 이 그림은 주축의 외경이 증가할 때 조립되는 베어링의 크기가 증가하고, 이에 상응하게 베어링의 강성이 증가하는 것을 고려한 최적 Span 분석결과이다. 그림 3(b)는 각 주축외경에 대응해서 최적 Span 이 존재한다는 사실에서 이때 주축선단의 처짐을 계산한 결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 주축외경 50mm 까지 주축외경이 증가하면 주축선단의 처짐이 급격히 감소함을 나타내고 있다.

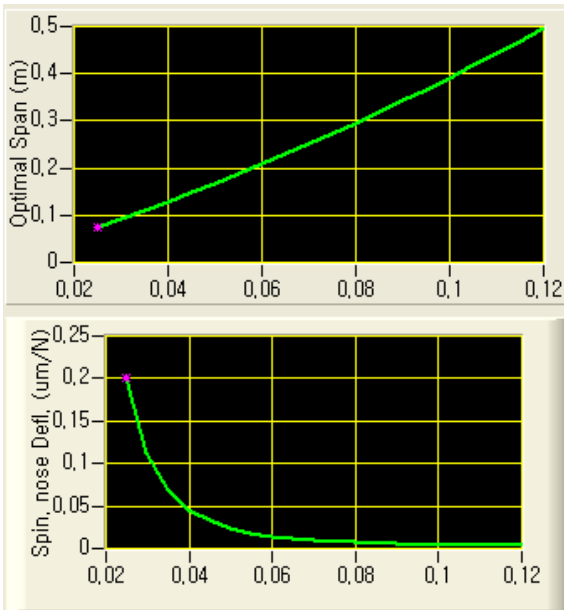


Fig. 3 Optimal Span (a) and Spindle nose Deflection (b) with Spindle Diameter

셋째, 주축 자체와 베어링의 처짐 기여율을 확인하여 기여율이 큰 것을 우선적으로 구조개선 실시함 : 주축선단의 처짐은 결국 주축빔 자체와 전후부 베어링의 처짐이 합하여 나온 결과이므로, 두 개의 처짐 기여율을 관찰하여 기여율이 큰 것을 집중적으로 개선한다. 그림 4 에 나타낸 바와 같이 약 주축외경이 70mm 일 때까지는 주축빔 자체의 처짐 기여율이 커서 주축빔의 외경을 크게 한다거나 굽힘곡선의 취약부를 개선하면 효과가 크다. 만약 주축외경이 70mm 를 넘을 때는 전후부 베어링의 강성을 높이던가, 베어링의 조립위치를 변화시키므로써 강성을 높인다.

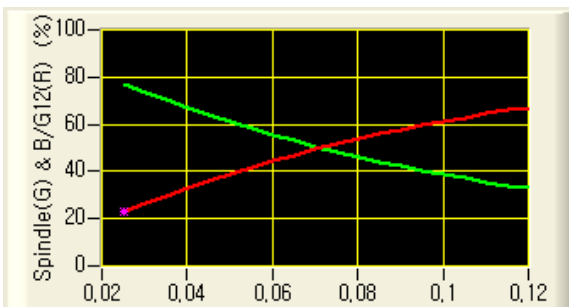


Fig. 4 Contribution Rate of Spindle & Rear Bearing with Spindle Diameter

넷째, 전후부 베어링의 주축선단 처짐 기여율을 확인하여 기여율이 큰 베어링부터 강성을 높여줌 : 그림 5 에 전후부 베어링의 처짐 기여율을 보면 주로 전부 베어링이 대부분 영향을 주고 있는데, 특히나 주축의 외경이 큰 경우는 전부 베어링의 강성을 높여주면 주축선단의 처짐 감소 효과가 크게 나타난다.

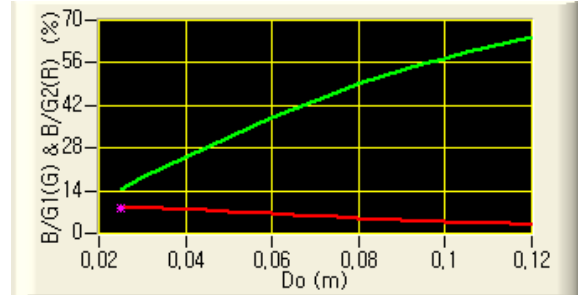


Fig. 5 Contribution Rate of Front & Rear Bearing with Spindle Diameter

4. 결론

주축선단의 처짐을 최소로 하는 주축 최적화는 다음과 같은 기법을 통해 주축을 고강성화 함으로써 실행될 수 있다.

1. 주축선단의 처짐을 최소로 하기 위해서는 베어링 Span 을 최적화하여 적용한다.
2. 주축외경을 증가시키면 최적 베어링 Span 은 상응하게 증가하고, 주축선단의 처짐은 급격히 작아진다. 특히나 주축외경 50mm 이하에서는 효과가 큼.
3. 주축 자체와 전후부 베어링의 주축선단 처짐 기여율을 확인하여 기여율이 큰 요소를 집중적으로 개선시키면 처짐 감소 효과가 크다. 특히나 주축외경 70mm 이하에서는 주축의 외경 증가가 효과 큼.
4. 전후부 베어링의 개선을 실시할 때, 전후부 베어링의 기여율을 확인하여 기여율이 큰 것부터 강성을 증가시킨다. 대부분의 경우 전부 베어링의 강성을 증가시키는 것이 효과 큼.

참고문헌

1. Berthold Spechtel., "Das Verhalten von Waelzlagern unter hohen Winkelbeschleunigungen" Shaker Verlag., 2002.
2. Manfred Weck., "Werkzeugmaschinen-Fertigungssysteme" Springer Verlag., 2002.