

# 공작기계 주축의 요소별 정동적 강성기여율 및 개선에 관한 연구

이찬홍\*, 박천홍, 이후상(한국기계연구원)

## The Contribution of Spindle Parts to Static, Dynamic Stiffness and Design Improvement

Chan Hong Lee\*, Chun Hong Park, Husang Lee (KIMM)

### ABSTRACT

The Spindle-Bearing System is very important unit for geometrical accuracy in machine tools. To improve effectively the weak point of spindle system, it is necessary that the contribution ratio of spindle core parts to static and dynamic stiffness is clarified. In this paper, static contribution ratio of core parts is calculated by overlapping static deformation of basic spindle design with one flexible parts. The dynamic contribution ratio for natural frequency and dynamic deformation at spindle end is obtained by calculating correlation between original and basic spindle deformation, by curve fitting with regressive method. It is proved the validity of estimation result is correct.

**Key Words** : Spindle (주축), Spindle Bearing (주축베어링), Static and Dynamic Stiffness (정동적 강성), Stiffness Contribution Analysis (강성기여율 분석), Design Improvement (설계개선)

### 1. 서론

공작기계의 고성능화와 생산원가 절감은 공작기계 제조사들의 영원한 테마이다. 고성능화 측면에서는 공작기계의 주축이 고속화되어 가공시간을 급격히 단축시키고 동시에 가공표면을 개선시키는 효과를 내고 있고, 이송계의 가감속도가 증가하면서 비절삭시간을 감소시키고 급격한 자유곡면을 정확히 추종해서 인간의 얼굴 같은 어려운 곡면을 만들어 낼 수 있는 능력이 생기게 된다. 기계구조물에 있어서도 내외부 진동에 강한 고 감쇠성 재료를 사용하여 유해한 진동이 절삭점에 전달되지 않도록 하고, 구조물내에 절연삭력의 전달경로를 파악하여 강성면에서 취약한 부위를 강화해서 기계전체의 강성이 약화되지 않도록 한다. 또한 고성능화 작업 외에 생산원가를 절감하기 위한 생산공정의 제고와 기계설계단계에서 설계상 시행착오의 차단이 필수적이다.

이와 같은 공작기계의 품질 대 가격 경쟁력 강화에는 주축의 설계가 큰 영향을 미치게 된다. 최신 공작기계는 회전수가 높고, 강력절삭 과 정밀절삭 능력 모두가 뛰어나서 부하면에서 분석하면 정적과 동적 강성이 우수해야 할 필요가 있다. 결국 정동적 부하에서 주축선단의 변위가 작아야 한다. 설계자의 입장에서는 주축선단의 변위를 최소화한다면 고 유진동수를 높이는 방법으로 주어진 주축의 요소부품을 적절히 조합하여 목적을 달성해야

한다. 그러나 현재 주축의 정동적 해석기법으로는 주축의 정적, 동적 변위에 대한 결과정보만을 가지고 있을 뿐, 관심위치의 정동적 변위가 어느 부품에 의해서 어느정도 영향을 받았는지, 변위에 대한 경로와 원인을 알 수 없다. 그래서 대안으로 주축의 정동강성 개선을 위해 취약한 부위를 주축 자체로 한정 정의하고 주축 자체의 굽힘곡선을 가지고 분석하여 주축의 국부적인 지름중대 기법을 사용하여 정동적 특성을 개선한 예가 있다<sup>(1)</sup>. 이런 상황에서, 만약 주축의 정적, 동적 특성에 각 요소부품이 기여하는 비율을 파악한다면 주축의 성능을 높이는 데 하나의 이정표가 될 수 있다.

본 연구에서는 공작기계 주축의 요소부품이 정적 동적 강성에 기여하는 비율을 파악하기 위해서 정적 강성에서는 변위 중첩법을 사용하고, 동적 강성에서는 진동모드 상관도를 이용하여 기여율을 분석하고 이에 따른 주축의 정동적 특성을 개선하였다.

### 2. 주축의 정동적 강성에 영향을 미치는 주요부품과 조건

주축시스템을 구성하는 관련부품으로는 주축 빔 자체로서 회전을 하는 탄성체가 있고, 주축 빔의 기하학적 위치를 유지시키는 주축대, 주축과 주축대 사이에 상대 회전운동을 가능하게 하는 전후부 베어링, 그리고 첨가질량으로서 선반의 경우는

Chuck의 질량, 내장형 모터의 질량 또는 동력전달용 풀리의 질량, Chucking을 위한 유압실린더 질량 등을 들 수 있다.

이중에서 설계자가 주축의 정동적 특성을 제어하기 위해서 사용할 수 있는 부품조건은 주축의 지름과 축방향 치수, 전후부 베어링의 강성크기와 설치위치를 선정할 수 있다. 여기서 베어링은 구매품으로서 반경방향 강성을 자유로이 변화시킬 수 있는 변수는 아니지만 주축의 예압을 조정하여 크게는 30%까지 추가할 수 있으므로 설계자가 변경할 수 있는 변수로 보았다. 그리고 첨가질량은 주변부품으로 구매로서 결정이 되므로 설계자의 변경대상이 아닌 것으로 보았다.

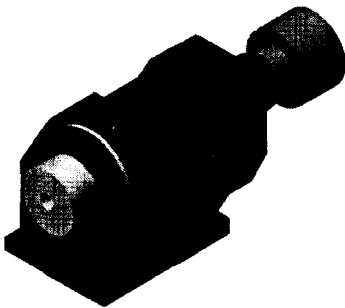


Fig. 1 Model of Spindle-Bearing System for Lathe

### 3. 주축의 정강성에 대한 기여율 분석

해석대상 주축은 Fig.1에 나타난 일반적인 선반 주축을 기준으로 Fig. 2와 같이 계산모델로 변환시켰다. 주축의 선단에는 단위 절삭력 1N이 가해진다고 가정하고 척의 질량 9kg, 풀리의 질량 8.5kg, 주축 후미의 유압실린더 질량 22kg을 고려하였다. 일반적인 주축에서 전부 베어링이 복수 개로 이루어져 있지만 한 개의 베어링으로 간략화 해도 정동적 특성에는 큰 변화가 없으므로, 전후부 1단 베어링 지지로 간략화 하였다. 본 연구에서는 주축의 상하방향의 변위가 가공정밀도에 큰 영향을 미치므로 이 방향에 대해서만 분석하였다.



Fig. 2 Spindle Model for Static and Dynamic Analysis

주축의 정강성에 대한 요소부품의 기여율을 분석하기 위해서 정적처짐에 대한 중첩법을 이용하였다. 주축의 정적처짐은 하중의 위치에 따라 여러가지 형태로 나타날 수 있지만, 가장 관심이 있는 조건은 주축선단에 절삭력이 가해지는데 따른 정적처

짐이라 할 수 있다. 이 정적변위는 하중이 주축 시스템에 전달되면서 각 참여 요소의 강성에 따라 중첩적으로 임의의 위치에서 변위가 더해져서 나타난 것이다. 그래서 주축시스템을 분석할 참여 요소만의 강성시스템으로 재구성하고 나머지 참여 요소는 무한대의 강성을 보유한 것으로 취급하면, 이 정적 계산 결과에서 모든 참여 요소를 고려한 주축의 정적변위에 대한 기여율을 파악할 수 있다. 여기서 분석을 할 요소부품은 주축 빔, 전후부 지지베어링으로 3개의 주축설계 경우만을 관찰하면 된다.

Table 1에는 주축의 주요 설계변수 조합을 3가지 종류로 나누어서 나타내었다. 해석대상 주축은 외경과 내경이 각각 100mm와 68mm이고 탄성계수가 일반적인 Steel 수준이고 전후부 베어링의 강성은 840과 400N/μm로 결정하였다. 첫번째 설계경우는 지지베어링이 주축 빔에 대해서 상대적으로 강체로 설계해서 주축 빔만의 정적변위가 나타나도록 하였고, 두번째 설계는 주축 빔과 전부 베어링을 강체로 해서 후부 베어링만의 영향을 받도록 하였다. 세번째 설계는 주축 빔과 후부 베어링을 강체로 설계해서 전부 베어링만의 영향을 받도록 하였다.

Table 1. Variation of Spindle Design Parameter

Spindle Variation	Spindle Diameter Out/In_D (mm)	Spindle Elasticity (N/m <sup>2</sup> )	Front B/G K (N/μm)	Rear B/G K (N/μm)
Original	100/68	2.1e+11	840	400
Var. 1	100/68	2.1e+11	50000	50000
Var. 2	100/68	2.1e+14	50000	400
Var. 3	100/68	2.1e+14	840	50000

Fig. 3에는 Table 1의 설계변수에 대한 정적변위 해석결과를 나타내었다. Fig.3(a)에는 모든 참여 변수를 고려한 주축의 정적변위를 나타내었고, (b)에는 주축 빔만의 영향, (c)에는 후부 지지베어링에 의한 영향, (d)에는 전부 지지베어링에 의한 영향을 나타내었다. 결국 (a)의 정적변위는 (b)+(c)+(d)의 정적 변위값과 동일한 것으로 나타난다. 이 결과로부터 주축선단(주축왼쪽)의 변위는 (a)에서 0.0242μm, (b)에서 0.017μm, (c)에서 0.0025μm, (d)에서 0.0047μm로서 각 부품의 정적 기여율을 계산할 수 있다. Fig. 4에는 각 참여부품의 전체 정적변위에 대한 기여율을 그래프로 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 주축선단의 변위는 주축 빔의 영향이 71%로서 가장 커서 선단변위를 개선하기 위해서는 우선적으로 주축 빔의 지름을 증가시키면 효과가 가장 큼을 알 수 있다. 다음으로 전후부 베어링의 기여율이 각각 19%, 10%로서 전부 베어링의 강성

개선이 후부보다 효과가 큰 것을 알 수 있다.

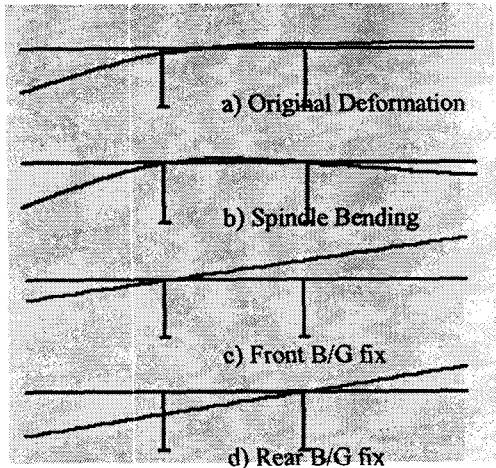


Fig. 3 Spindle Deformation with Design Variation

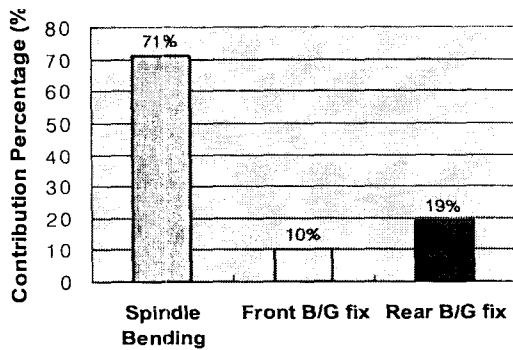


Fig. 4 Contribution Ratio of Spindle Parts to Static Deformation in Left End

이러한 결과를 증명하기 위해서 각 참여 부품의 특성을 바꾸어서 해석하였다. 우선 주축 빔의 외경을 10mm 증가시켰을 때 선단의 처짐은  $0.0179\mu\text{m}$ 로서 처짐이 작아져 26% 개선되었고, 전부 베어링만의 강성을  $1000\text{N}/\mu\text{m}$  증가시켰을 때는 11%, 그리고 후부 베어링만의 강성을  $1000\text{N}/\mu\text{m}$  증가시켰을 때는 7.7% 개선되었다. 이것으로 기여율에 따른 정적 변위의 개선책이 타당한 것으로 나타났다.

주축의 각 위치에서 참여부품의 기여율은 동일하지 않고 변화가 많다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 주축의 전반부에서는 주축 빔의 굽힘에 의한 처짐이 주도적임을 나타내고, 전후부 지지베어링 사이의 구간에서는 주축의 변위가 매우 작기는 하지만 전후부 베어링 모두가 주도적이고, 주축의 후반부에서는 후부 베어링과 주축 빔이 주도적임을 알 수 있다. 이러한 분석적인 방법에 의한 구조개선이 큰

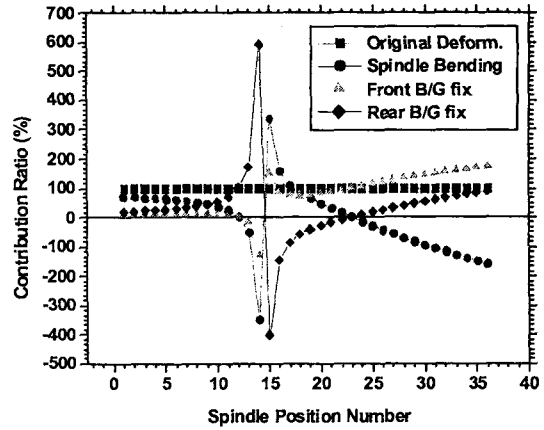


Fig. 5 Contribution Ratio of Spindle Parts according to Spindle Position

효과를 나타내는 예는 주축의 오른쪽 끝단의 처짐개선을 해 보면 알 수 있다. Fig. 6에는 각 부품의 처짐 기여율을 나타내었다. 가장 큰 영향을 미치는 부품은 후부 베어링으로서 개선의 대상이 되고, 주축 빔의 역 기여율 의미는 해석주축의 처짐과 반대 방향으로 처짐을 의미하고 주축 빔의 강성을 개선하면 오히려 주축 끝단의 처짐이 양방향으로 증가함을 나타낸다. 일반적인 개념으로 주축 빔의 강화가 처짐증가로 나타나는 것은 생각하기 힘들다. 이것을 증명해 보면 주축 빔의 지름을 30mm 증가시키면 초기 끝단의 변위가  $-0.0032\mu\text{m}$ 에서  $-0.0068\mu\text{m}$ 로 오히려 증가된다. 그리고 전부 베어링의 강성을  $50\text{N}/\mu\text{m}$  증가시키면 3% 개선되고, 후부 베어링을 동일하게 강성을 증가시키면 19% 처짐개선이 된다.

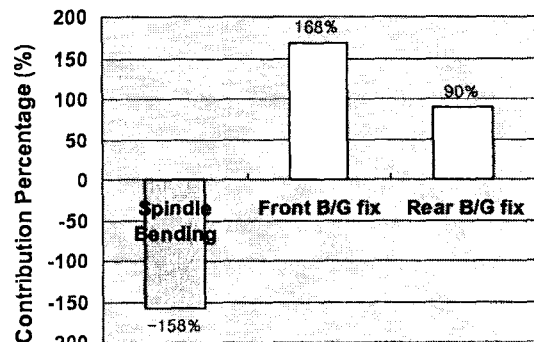


Fig. 6 Contribution Ratio of Spindle Parts to Static Deformation in Right End

#### 4. 주축의 동강성과 고유진동수에 대한 기여율 분석

주축의 동강성에 대한 요소부품의 기여율은 정강성과 같이 지정된 위치에 외부하중을 가했을 때 발생한 정적처짐이라는 하나의 목표를 지향하는 것이 아니고, 외부하중 진동수에 따라 구조물의 동적 처짐이 계속 변화하므로 중첩법을 사용하기 어렵다.

동적 특성을 나타내는 파라미터는 고유진동수와 공진진폭으로, 관심있는 위치에 대한 동적 전달함수를 계산하여 가장 기여를 많이 하는 고유진동수의 진동모드를 집중적으로 개선을 하면 된다. 이렇게 하면 해당 고유진동수를 증가시키기도 하고 관심위치의 동적변위도 감소시킬 수 있다.

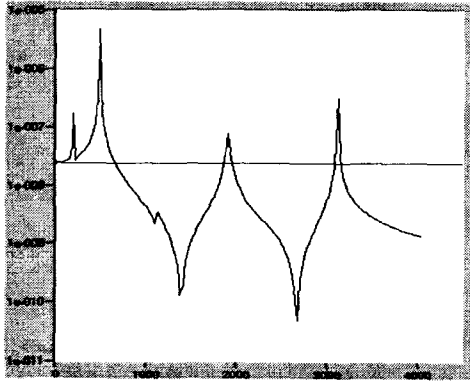


Fig. 7 Dynamic Transfer Function at Spindle Nose(Left End)

Fig.7 에는 Fig.2 에 나타낸 초기 모델 주축시스템의 선단에서 전달함수를 계산해 낸 결과를 나타내었다. 그림에서 보이듯이 2 차 고유진동수가 선단의 변위에 가장 많이 기여를 함을 알 수 있다. 그래서 동적변위에 가장 많은 영향을 미치는 1 차, 2 차 진동모드중 2 차모드를 집중적으로 개선하도록 한다(Fig.8).

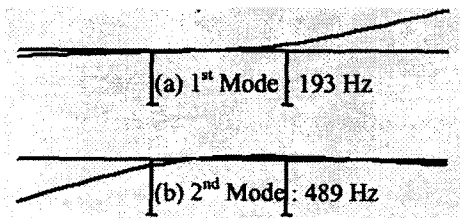
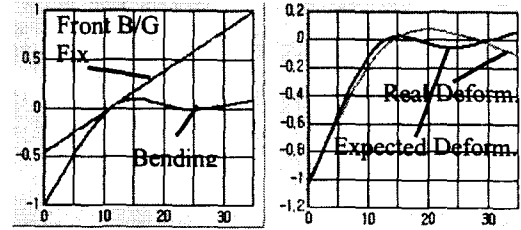


Fig. 8 Dynamic Transfer Function at Spindle Nose(Left End)

2 차 진동모드는 Table1 의 Var.1 과 Var.2 의 조합으로 생각할 수 있다. Var.3 과의 조합도 생각할 수

있지만 Var.2 와의 반대 방향은 물리적으로 허용되지 못하게 되어 있으므로 Var.2 만 고려하도록 한다.



(a) Mode Combination (b) Curve Fitting

Fig. 9 Curve Fitting for Contribution Ratio Analysis

Fig.9 에는 2 차 진동모드에 대한 각 요소부품의 기여율을 회기분석법에 의해 Curve Fitting 해서 얻은 결과를 나타내었다. 일단 2 차 고유진동수 489 Hz 에 대해서 주축 Bending 곡선의 상관도가 0.97 이었고, 전후부 베어링으로 인한 곡선의 상관도가 0.75 로서 상대적인 기여비율은 56%와 44%로 생각할 수 있다. 그래서 주축 빔의 지름을 강화하면 지지베어링의 강성개선보다 2 차 고유진동수가 상대적으로 많이 증가할 것으로 예상된다. 검증계산으로 주축지름을 10%상승시키고, 전후부 베어링 강성을 10%증가시켰을 때 고유진동수를 비교하였다. 지름의 증가시에는 12Hz 상승, 전후부 베어링의 경우는 각각 8Hz, 1Hz 증가로 나타나서 타당성이 증명되었다. 회기분석법에 따른 주축선단의 변위 기여율은 주축 Bending 이 95%를 차지하고, 전후부 베어링이 약 5%를 차지하고 있다. 검증계산에 의하면 주축 지름 증가시 35%의 변위개선이 있었다.

#### 4. 결론

1. 주축시스템의 정동적 강성에 기여하고, 설계변경이 가능한 요소부품은 주축 빔, 전후부 지지베어링으로 결정하였다.
2. 주축시스템의 정강성에 대한 요소부품의 기여율은 정적변위 중첩법을 사용하여 계산할 수 있고, 정적강성 개선의 확실한 이정표가 되었다.
3. 동강성에 대한 기여율은 전달함수를 사용하여 대상 진동모드를 결정하고, 상관도에 따른 각 요소부품의 고유진동수 기여율을 계산할 수 있다. 또한 회기분석법에 의한 Curve Fitting 으로 절삭점의 동적변위에 대한 기여율을 예측/개선할 수 있다.

#### 참고문헌

1. 이찬홍,이후상, "굽힘곡선을 이용한 공작기계 주축의 정적 동적 취약부 규명", 한국정밀공학회, 제 15 권 제 12 호, pp.188-193, 1998.