

고속 주축 베어링의 조립공차에 관한 연구

김 인 찬*, 이 찬 홍**, 정 윤 고***

* 창원대학교 대학원

** 한국기계연구원

*** 창원대학교 기계공학과

1. 서론

최근 항공, 자동차산업을 필두로 해서 가전산업에 이르는 많은 민수산업에서 경량화를 목표로한 연질금속의 소형 가공품이 급격히 증가하고 있고, 특수조건을 겨냥한 세라믹과 복합소재와 같은 신소재의 개발 및 적용이 활발히 일어나고 있다. 이와같은 추세는 생산성 향상과 가공면의 고품위화를 동시에 만족하면서 진행되어야 하므로 고속, 고능률 가공시스템이 필수적으로 요구된다. 여기서 고속 가공시스템은 고속 주축과 고속 이송시스템이 핵심이 되는 기능을 발휘해야 하고, 기능에 있어서는 지속적인 신뢰성이 보장되어야 한다. 이런 성능을 갖추기 위해서는 설계시에 정적, 동적, 열적 특성을 감안하여 적절한 설계치수를 선택해야 한다. 그러나 실제 기계의 제작에 있어서는 설계상에서 고려되지 않은 가공공차 및 조립방법과 공정을 위한 조립공차가 존재해서 요구성능과 실제성능에 있어서 차이가 있게 된다. 또한 일반적으로 사용하는 조립공차는 그 근거가 매우 불분명하고, 근거가 있다 해도 대부분의 범위에서 부하조건을 설정하고 얻은 결과이므로 실제로 각각의 사용조건에 적용하기는 문제가 많다.

특히 주축베어링의 경우에는 베어링 배열, 회전속도, 예압량, 축 부하용량, 열발생량등을 고려하여 베어링 조립공차의 범위를 결정해야 함에도, 대부분 베어링 카탈로그에서 추천하는 단일 조립공차를 적용하므로써 베어링에 무리가 가고, 주축에 요구했던 정, 동, 열적 특성이 나오지 않는다. 주축시스템은 지속적으로 고속화가 진행되어 운전조건이 매우 가혹하게 되므로 조립공차에 대한 문제는 점차 크게 대두될 것이 예상된다. 본 연구에서는 베어링의 예압량, 회전속도, 열팽창량이 베어링의 내·외륜 지름변화에 어떤 영향을 미치는지 분석하고, 베어링 제조사에서 추천하는 조립공차가 고속주축의 작동조건에 어느정도 타당한지를 분석하였다.

2. 예압에 의한 베어링의 지름 변화

공작기계용 고속 주축베어링으로는 강성과 부하용량이 크고, 윤활이 간편하면서 열발생이 매우 적은 베어링이 적당하다. 그래서 대부분의 고속 주축 베어링으로는 앵글러 콘택트 볼베어링을 사용하고 있다. 본 연구에서는 FAG사의 고속 베어링 IIS719C Series를 대상으로 분석하였고 접촉각은 15°이다.

주축 베어링의 예압은 반경방향과 축방향의 간극을 제거함은 물론 각 방향의 강성을 증가시키는 효과가 있다. 예압은 Lock Nut에 의해 만들어 지고 베어링 내륜의 Z방향 이동이 볼을 매개로 해서 베어링의 외륜을 밀게되어 예압이 형성된다. 이때 베어링 외륜은 예압량에 따라 지름의 변화가 생기게 되어 베어링 외륜의 조립공차에 영향을 주게 된다. 우선 예압량에 대한 베어링 외륜의 지름변화를 이론적으로 계산하기 위해서 원환용력을 이용한 지름의 변형식을 유도하면 아래와 같은 식이 된다.

$$\delta_d = \frac{2P \cdot r^2}{t \cdot E} \dots\dots\dots(1)$$

P : 예압량(N) r : 베어링의 반경(mm)
t : 반경방향 두께(mm) E : 탄성계수(2.1×10⁶N/mm²)

이 식에서 알 수 있는 것은 베어링의 외륜팽창이 예압량에 비례하여 커지고, 베어링의 지름이 커지면 외륜팽창량이 지름에 자승꼴로 증가한다. 그림1에는 예압량 117N으로 동일한 경우 베어링 지름 50mm에서 90mm까지 외륜팽창량을 나타냈고, 또한 IIS719C Series의 추천 예압에 대한 외륜팽창량을 나타냈다. 그림에서 나타난 바와 같이 예압량에 따른 외륜팽창량이 매우 작은 것을 알 수 있다.

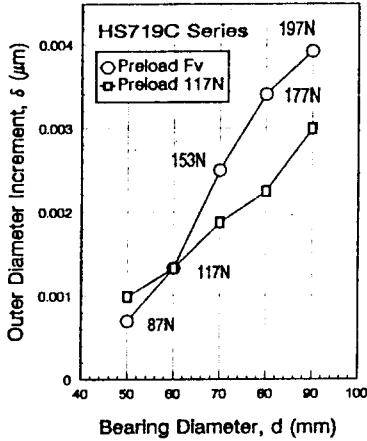


그림 1 : 예압에 대한 베어링의 외륜지름 변화량

3. 원심력에 의한 베어링의 지름변화

주축의 고속화가 진행될수록 주축에 조립되어 있는 주축베어링의 내륜과 볼은 자게 회전질량에 의해서 원심력을 받게 되는데, 내륜의 경우에는 내륜지름의 팽창효과가 나타나고 볼의 경우에는 외륜을 원심력에 의해 하중을 가함으로 해서 외륜지름의 팽창이 야기된다. 그러나 내륜과 볼의 회전수는 각각 달라서 내륜은 주축과 동일한 회전수를 갖고, 볼은 볼의 공전계산식에 의해 값을 얻을 수 있는데 베어링의 지름에 따라 차이가 있지만 대략 주축회전수의 1/2전후로 해서 회전한다. 베어링의 회전시 원심력을 계산하기 위해서 원환용력을 이용한 변형식을 유도하면 식(1)과 비슷하게 아래와 같이 나타난다.

$$\delta_r = \frac{2\rho \cdot r^3 \cdot \omega^2}{E} \dots\dots\dots(2)$$

ρ : 밀도 (kg/mm³) r : 베어링 내·외륜 반경(mm)
 ω : 회전각속도(rad/sec)

식(2)를 이용하여 원심력에 의한 베어링의 내·외륜 지름 변화량을 계산할 수 있다. 식에서 보듯이 지름변화량은 반지름의 3승에 비례해서 증가하여 베어링의 크기가 커질수록 변형량이 매우 커지고, 또한 회전속도에 의해서도 4승에 비례적으로 증가해서 원심력에 의한 영향이 적지 않음을 나타낸다. 그림2에서 나타내듯이 회전수 10,000rpm에서 베어링 지름 70mm에 대해서

4 μ m의 열팽창이 생김을 알 수 있다. 그러나 회전수 15,000rpm에서는 팽창량이 9 μ m에 달하게 된다. 그래서 원심력에 의한 지름 팽창량은 조립공차를 결정하는데 꼭 고려해야 할 사항이 된다.

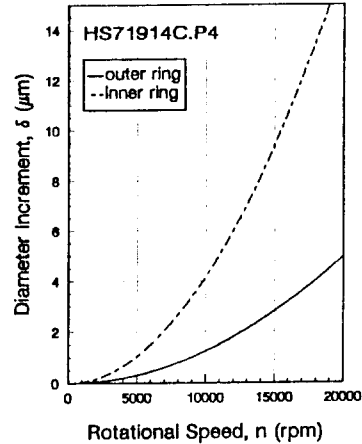


그림 2 : 원심력과 회전수에 따른 베어링의 내·외륜 지름의 변형량

그림3에는 HS719C Series의 베어링이 회전수 10,000rpm으로 회전할 때 베어링의 지름을 변화시키면서 내·외륜의 지름 팽창량을 관찰한 것이다. 그림에서 나타내듯이 베어링 지름 100mm에서 내륜지름의 팽창량이 12 μ m에 이르고 있다. 반면 외륜의 팽창량은 상대적으로 작아서 원심력에 의한 영향은 내륜팽창으로 주도된다고 할 수 있다. 그리고 내륜 지름의 팽창량 곡선을 관찰할때, 주축의 지름이 크고 고속 회전을 할 경우에는 열팽창이 많아 해당 베어링 조립 공차에 대해서 많은 고려가 요구된다.

4. 열변형에 의한 베어링의 지름변화

주축이 고속화가 되면 원심력에 의한 영향외에 발열로 인한 주축베어링의 열팽창을 예상할 수 있다. 특히 베어링 부위는 주축이나 주축하우징과는 달리 볼이 회전하면서 마찰을 해서 국부적으로 50~60℃의 온도변화가 생긴다. 윤활에 의해서 작동온도가 다소 떨어지기는 하지만 전반적인 온도차는 30℃를 넘게 된다. 또한 베어링 내에서도 각 부위별로 온도차이가 나타나는데, 내륜의 경우에는 축으로 열전도가 되기는 하지만 주축의 크기가 작고 더 이상 열전도가 될 곳이 없으므로

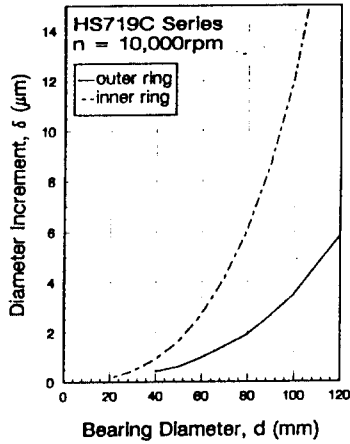


그림 3 : 원심력과 베어링 지름에 따른 베어링의 내·외륜 지름의 변형량

로 주축 하우징쪽 보다는 온도가 높아지고, 따라서 내륜의 온도가 외륜의 온도보다 수℃ 정도 높게 된다. 외륜의 경우에는 주축하우징으로 열전달을 계속해서 냉각되므로 온도가 많이 올라가지는 않는다. 그림4에는 지름이 70mm인 베어링에서 내·외륜 온도가 동일하다고 가정하고 식(3)에 의해서 내·외륜 지름의 팽창량을 계산하여 나타내었다.

$$\Delta d = d_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots(3)$$

d_0 : 초기지름(mm) α : 열팽창계수($12.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
 Δt : 온도차($^{\circ}\text{C}$)

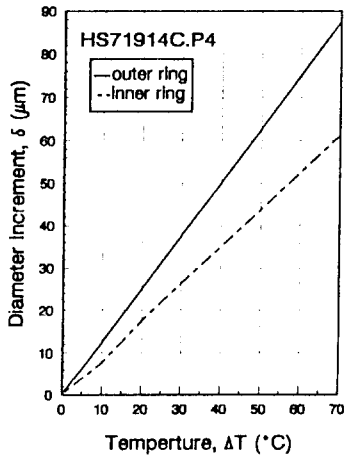


그림4 : 베어링의 온도에 따른 내·외륜 지름의 열변형량

그림4에 나타난 지름의 열팽창량은 예압과 원심력에 의한 팽창량보다 거의 10배 가까이 변화하고 있다. 그리고 같은 온도에서 내·외륜의 열팽창량은 내·외륜의 초기지름이 다름으로 해서 차이가 생긴다. 예를 들어 40℃에서는 내·외륜의 팽창량 차이가 지름방향으로 15μm에 달한다. 그러나 실제로는 외륜의 열팽창이 주축하우징 이상으로 변화할 수 없으므로 수μm정도의 내·외륜 간극이 생길것이 예상된다. 그림5에는 베어링의 지름과 작동온도의 변화에 따른 외륜지름의 팽창량을 나타내었다. 그림에서와 같이 작동온도차가 커질수록 외륜팽창량의 기울기가 급하게 증가하고, 베어링 지름의 크기가 커질수록 팽창량은 더욱 증가하는 것을 알 수 있다.

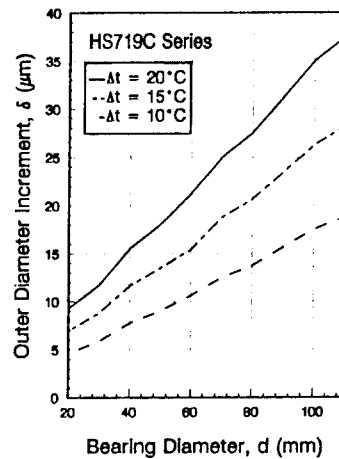


그림 5 : 작동온도차와 베어링지름에 따른 외륜지름의 열변형량

이상의 결과를 정리해 보면 베어링의 조립공차에 가장 영향을 많이 미치는 것은 열팽창에 의한 베어링의 내·외륜 지름변화이고, 두번째로 원심력이고 세번째는 예압에 의한 것으로서 예압은 무시해도 좋을 정도로 미소하다. 그림6에는 3개의 베어링지름에 대해서 이들 3가지 영향요소의 효과를 평가한 결과이다. 3개의 베어링 지름에서 열팽창에 의한 효과가 지배적임을 알 수 있다.

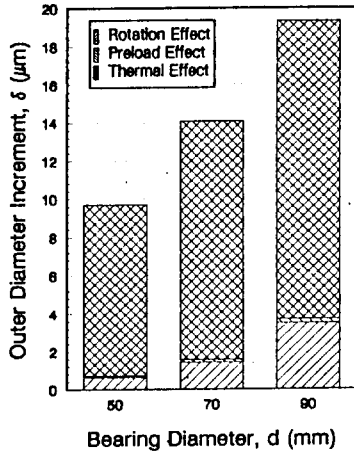


그림 6 : 베어링의 조립공차에 미치는 영향요소들의 효과

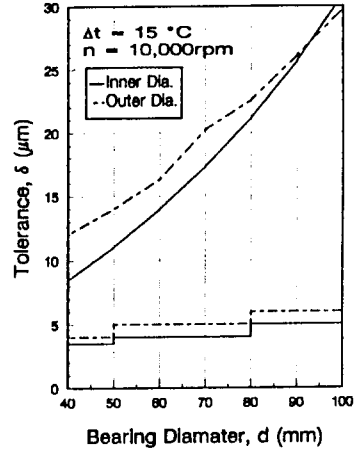


그림 7 : 추천 조립공차와 베어링 지름의 팽창량 비교

그림7에는 베어링의 호칭지름에 대한 베어링제조사의 추천 공차와 회전속도 10,000rpm, 온도차 15℃인 경우에 베어링 내·외륜의 지름 팽창량을 비교한 것이다. 이 그림에 의하면 베어링 지름이 클수록 많은 억지 끼워 맞춤 공차가 필요한데 추천공차는 너무 낮게 제시되어 있음을 나타내고 있다. 예를들어 내륜의 조립 공차는 베어링 지름 50~80mm사이에서 추천공차인 -4 μm이기보다는 약 -12μm정도의 억지끼워 맞춤 공차가 필요한 것으로 나타나고 있다. 그러나 축 자체도 원심력과 온도차의 영향을 받아 팽창이 될 것이므로 적절한 공차는 -7μm정도가 된다. 경우에 따라서는 고속주축계가 더욱 가혹한 조건에서 작동될 수도 있으므로 억지끼워 맞춤의 크기를 더욱 크게 할 필요성이 있다. 또한 베어링의 지름이 90mm이상일 경우에는 원심력에 의한 내륜의 팽창량이 매우 커서 외륜의 총합 팽창량을 초과하고 있다. 그러나 어떠한 경우에도 외륜은 주축 하우징에 의해 팽창이 저지된 상태이기 때문에 주로 내륜의 공차 선정에 면밀한 검토가 요구된다.

5. 결 론

본 연구에서는 베어링의 예압량, 회전속도, 열팽창량이 베어링의 내·외륜 지름변화에 어떤 영향을 미치는지 분석하고, 베어링 제조사의 추천 조립공차가 고속주축의 작동조건에 타당한지를 분석하였다.

- 1) 예압에 의한 베어링의 외륜지름 변화는 매우 미소하여 무시해도 좋다.
- 2) 원심력에 의한 영향은 베어링의 지름이 60mm 이상이고 회전수가 9,000rpm을 상회하면 고려의 대상이 된다.
- 3) 베어링의 열팽창은 원심력에 의한 팽창보다 10배 정도가 크다.
- 4) 일반적으로 사용되는 베어링의 추천 조립공차는 고속 주축베어링의 지름 변형량의 50%정도에 불과해서, 적절한 조립공차는 추천 공차의 약 2배 정도로 결정하는 것이 좋겠다.

참고문헌

- 1) 최대봉, 김석일, 송지복 "공작기계용 고속주축계의 공기 냉각특성에 관한 연구", 한국정밀공학회지, vol 11, No 1, 1994.
- 2) 이찬홍, 최대봉, 이득우, "고속주축계의 열특성 개선", G7첨단생산시스템,생산기술연구원, 1993.
- 3) FAG, High-Speed Spindle Bearing Catalogue
- 4) 이찬홍, "정적, 동적, 열적 특성을 고려한 고정도 주축설계", '94 NC 공작기계 기술세미나, 1994.