

45,000rpm 주축의 최적 치수와 베어링 간격 결정에 관한 연구

A Study on the Determination of Optimal Shaft Size and Bearing Span Length of 45,000rpm Spindle

*박성진¹, *이훈만², 김동현¹

*S. J. Park¹, *C. M. Lee(cmlee@changwon.ac.kr)², D. H. Kim¹
¹ 창원대학교 기계설계공학과, ² 창원대학교 메카트로닉스공학부

Key words : Extreme vertices design, Shaft size, ARMD

1. 서론

최근 공작기계 분야의 초고속 주축은 회전특성과 더불어 회전 정밀도와 주축의 가감속 특성이 복합적으로 요구되는 가장 까다로운 기술 분야 중 하나이다. 최근의 공작기계용 주축에서는 초고속, 고정밀 주축에 대한 필요성이 점점 증대하고 있다. 항공기 부품과 반도체 분야 등에서는 주축 속도 DmN 200만 이상의 초고속 주축을 이용한 고속가공이 이루어지고 있고 가공정밀도는 마이크로단계를 지나 나노단계로 향하는 초고정밀로 이어지고 있다.

주축의 초고속, 고정밀을 위해서는 주축의 운용 가능 회전수 범위가 넓고 저속에서의 황삭 가공과 고속에서의 정삭 가공이 하나의 주축으로 가능해야함과 동시에 정강성과 동강성을 충분히 확보하여 가공 정밀도를 향상시켜야 한다. 주축 회전 시 필연적으로 발생하는 진동 문제는 공작물의 가공정밀도에 직접적인 영향을 주며 베어링 수명과 톨홀더의 안정성에 문제를 야기시킬 수 있다.

주축계의 안정적인 정강성을 확보하기 위해서는 베어링 강성, 베어링 간 길이, 주축 사이즈, 주축 인터페이스부 형상, 베어링 접촉각 등의 결정이 매우 중요하다. 이 중 주축 사이즈와 베어링 간 길이는 주축계의 강성뿐만 아니라, 베어링의 제한속도, 주축의 고유진동수를 결정하는 매우 중요한 요소이다.

일반적으로 공작기계용 주축은 개념설계가 이루어지고 구성이 결정되면 주축 사이즈 검토 단계를 거친다. 주축 사이즈 검토 단계에서는 강성과 위험속도에 대한 해석이 주로 이루어지며 이를 바탕으로 주축에 요구되는 강성과 회전속도를 만족하는 최적의 설계변수조합을 찾아내는 것이 중요하다. 주축 설계 최적화를 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며 다양한 기법과 결과가 발표되어져 왔다. 그 중 꼭지점 계획법은 제한된 영역의 모든 꼭지점과 이 꼭지점들의 선형조합으로 이루어지는 몇 개의 점을 적절히 선택하여 실험을 실시하며 이는 주축설계에서와 같이 규격품을 사용함에 따른 제한조건이 발생하는 경우에 적절히 사용될 수 있을 것으로 기대된다.¹

본 연구에서는 45,000rpm 주축 설계에 있어서 베어링과 모터의 위치 제한조건을 고려하여 고유 진동수를 최대화 할 수 있는 베어링과 모터의 최적 위치를 찾아낼 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 위해 꼭지점 계획법을 이용하고 위험속도를 해석하기 위해 회전체 해석 프로그램인 ARMD를 이용하였으며 실험분석은 통계전용 프로그램인 MINITAB을 이용하였다.

2. 주축계 해석모델

공작기계용 주축계의 강성은 전체 가공정밀도에 많은 영향을 미치므로 매우 중요하다. 주축계의 강성에는 베어링의 간격, 베어링의 선경, 축경의 결정이 중요한 요인이다. 따라서 강성이 높은 베어링을 선택하고 오버행과 베어링 간격을 작게 하는 것이 좋지만 너무 작으면 베어링의 수명에 나쁜 영향을 주므로 적절히 결정하여야 한다. 일반적인 추천범위는 식 (1), (2)와 같다.

$$3d_o \leq L \leq 4.5d_o \quad (1)$$

$$\frac{L}{3} \leq C \leq \frac{L}{2} \quad (2)$$

여기서 L은 베어링 지지부간 거리, C는 오버행 길이, d0는 메인 샤프트의 외경이다.

해석모델은 회전체 해석 전용 프로그램인 ARMD를 이용하여 굽힘 고유진동수를 예측하는 모델을 구축하였으며 Fig. 1과 같다. 모터의 로터부는 질량효과와 관성효과만을 고려한 디스크로 처리하였으며 베어링은 강성효과만을 고려하였다.

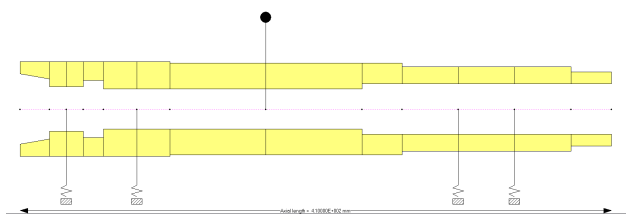


Fig. 1 Rotor shaft-bearing modeling

주축의 위험속도는 최대 운전속도 45,000rpm과 분리여유 30%를 감안하여 58,500rpm이다.

3. 실험계획수립

꼭지점 계획법을 이용하여 실험 계획을 수립하기 위해서는 먼저 설계변수를 결정하고 결정된 설계변수들의 상한, 하한 제약 조건을 결정 한 후 부분과 전체에 대한 합 제약 조건이 결정되어야 한다. 주축의 사이즈를 결정하는 여러 변수들로는 주축의 축경, 베어링과 모터의 위치, 그리고 주축의 전체길이 등이 있다. 하지만 주축 축경의 경우 일반적으로 베어링과 모터 등의 규격에 의해 제한되고 주축의 전체 길이는 클램핑 시스템의 규격에 의해 제한을 받는다. 따라서 본 연구에서는 베어링과 모터의 위치를 설계변수로 두고 주축의 축경과 전체길이를 고정변수로 설정하였다.

주축 선단부에서 베어링과 모터의 각 지점 사이의 거리와 주축 사이즈를 결정하는 변수들을 Fig. 2에 나타내었다.

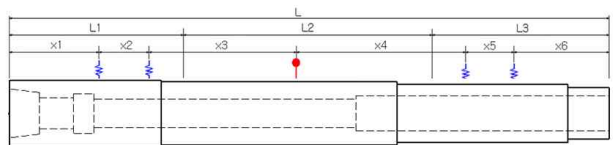


Fig. 2 Design variables for bearing and motor locations

앞서 소개한 베어링 지지부간 거리와 오버행의 일반적인 추천 범위와 베어링과 모터의 규격에 따른 치수, 그리고 윤활과 냉각에 따른 관로 등을 고려하여 설계변수의 범위를 선정하였으며 HSK-E40 형식 주축의 표준 클램핑 시스템의 치수를 고려하여 주축 전체의 길이를 선정하였다.

설계변수 중 X₁은 주축 최선단부와 제 1 전륜 베어링의 거리이고 X₂는 제 1 전륜 베어링과 제 2 전륜 베어링 사이의 거리, X₃은 제 2 전륜 베어링과 모터의 중심까지의 거리, X₄는 모터 중심부와 제 1 후륜 베어링 사이의 거리이다. X₅는 제 1 후륜 베어링과 제 2 후륜 베어링 사이의 거리이고 X₆는 제 2 후륜 베어링과 주축 끝단 사이의 거리이다.

4. 실험 분석

앞서 설정한 범위를 MINITAB을 이용하여 Case를 산출해 내었다. 이를 ARMD를 통해 전산실험을 실시하여 그 결과를 다시 MINITAB을 이용하여 분석하였다.

적절한 분석방법을 선택하기 위해 모형 적합방법을 혼합물 회귀(mixture regression)로 선택하였다. 혼합물 회귀를 이용해 회귀 모형을 추정하였으며 회귀 모형에 대한 p-값이 0, 결정계수 (R^2_{adj}) 값이 97.21%로 추정된 모형이 타당한 것으로 판단된다.

고유진동수에 대한 반응계적도를 도출하여 각각의 인자가 어떻게 반응에 영향을 미치는지를 기준 혼합과 상대적으로 비교해보았다. 분석결과 X_1 , X_4 , X_6 설계변수가 큰 영향을 미치고 X_2 , X_5 는 거의 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

이를 바탕으로 고정 시킬 변수 3개와 변화 시킬 변수 3개를 각각 선정하여 등고선도를 도출하였다. 이 등고선도는 고정변수의 값에 따른 설계변수들의 범위를 나타낸다.

5. 결론

45,000rpm주축에 대해서 최적의 주축 치수와 베어링간의 길이를 결정하기 위해 꼭지점 계획법과 회전체 해석 프로그램인 ARMD, 그리고 통계 소프트웨어 MINITAB을 이용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

먼저 주축 설계의 경우에서처럼 베어링과 모터, 그리고 클램핑 시스템의 규격에 의해 특정 변수가 제한을 받는 경우 꼭지점 계획법이 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 꼭지점 계획법을 이용한 실험 분석을 통하여 제한조건을 고려한 설계변수들의 최대폭의 설계범위에 대한 최적의 주축 치수와 베어링 간격을 결정하는데 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 황영국, 이춘만, "꼭지점계획법을 이용한 주축 치수 결정에 관한 연구," 한국공작기계학회논문집, Vol.18, No.2, 214-220, 2009.
2. 신재호, 이춘만, "실험계획법을 이용한 주축 형상 설계에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol.26, No.4, 120-127, 2009.
3. 임정숙, 정원지, 이춘만, 이정환 "다구찌 방법을 이용한 고속주축의 강성개선," 한국정밀공학회지, Vol.24, No.2, 127-133, 2007.
4. 임정숙, 정원지, 이춘만, "40,000rpm 고속 주축의 정·동특성 향상을 위한 베어링 위치 선정," 한국기계가공학회지, Vol.8, No.1, 10-17, 2009.
5. 박기범, 정원지, 이춘만, "초고속 스피들의 모델 개선법," 한국공작기계학회논문집, Vol.17, No.2, 7-12, 2008.
6. 양보석, "회전기계의 진동," 인터비전, 2002.
7. 이승훈, "Minitab을 이용한 공학통계 자료분석," 이레테크, 2008.
8. Maeda, O., Cao, Y. and Altintas, Y., "Expert spindle design system," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45, 537-548, 2005.