

4 , RPM 고속 주축의 열변형 해석 및 실험

Thermal Displacement nal sis and periment of 4 , RPM pindle

*#임정숙¹, 유기한², 이춘만², 정원지², 김수태², 이정환¹

*#J. S. Lim(cluster4@changwon.ac.kr)¹, G. H. Yu², C. M. Lee², W. J. Chung², S. T. Kim², J. H. Lee¹

¹ 한국기계연구원 부설 재료연구소, ²창원대학교 메카트로닉스공학부

Key words : High Speed Spindle, Thermal Displacement, Bearing Preload

1. 서론

최근 공작기계는 회전수가 높고, 정밀절삭과 강력절삭이 모두 뛰어난 제품을 개발하는데 초점을 두고 있다. 이러한 공작기계의 가장 핵심적인 요소인 고속 주축을 설계하기 위해서는 고유진동수를 높인다거나 주축 선단의 변위를 최소화 하는 방법¹도 있지만, 컴팩트하게 설계된 주축에서 반드시 해결되어야 하는 것이 열변형 문제이다. 따라서 고속 주축에서 제품의 가공정밀도에 큰 영향을 미치는 발열과 열변형 문제를 해결하기 위해 주축의 열특성을 정확히 예측하는 것이 중요하고 또한 주축의 냉각과 베어링 예압의 방법과 조건을 설정하는 연구가 필요하다².

본 연구에서는 선행 연구를 통해서 개발된 40,000RPM 스피들을 유한요소해석을 이용하여 무부하 회전에서 주축계의 발열 특성에 의한 온도분포 및 열변형을 이론적으로 해석하여, 이를 예측하고 실제 실험과 비교, 분석하고자 한다.

2. 4 , RPM 고속주축 모델

2.1.4 , RPM 고속주축의 구조 및 유한요소모델

공작기계용 40,000RPM($1.94 \times 10^6 \text{DmN}$)급 초고속 주축계를 Fig. 1과 같이 설계 하였다. 이 주축계는 자동공구교환을 하기 위해 드로우바가 장착되어 있는 형태이며, 이 드로우바 때문에 주축은 중공의 형태로 되어 있다. 주축의 소재는 질화강인 SACM645를 사용하였으며, 그 외의 부품들을 S45C를 주로 사용 하였다. 또한 컴팩트한 built-in type으로 스피들에 내장형 모터의 회전부(rotor)가 열박을 되게 된다. 전반부와 후반부의 베어링은 접촉각이 15°인 단렬 세라믹 볼 베어링으로 GMN사의 HYSM6007C를 사용하였으며, 윤활방식은 오일-에어를 적용한 타입이다. 그리고 내장형 모터와 전반부 베어링에서 발생하는 열을 냉각시키기 위해 주축 하우징에 냉각오일을 강제 순환시킬 수 있는 구조로 되어 있다.

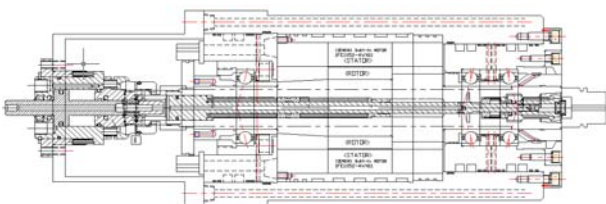


Fig. 1 Schematic diagram of 40,000RPM spindle system

2.2 해석 및 실험 조건

위의 Fig. 1에 설계된 고속 주축은 최대 속도가 40,000RPM이고, 상용속도는 30,000RPM을 목표로 개발되어진 제품이다. 따라서 본 연구에서는 10000, 20000, 30000RPM에서의 베어링 예압과 냉각 유량에 따른 온도분포 및 열변형 해석을 수행하고, 이 조건에 따라 온도 및 열변위를 측정하여 해석된 결과와 비교하여 보다 자세한 주축계의 열특성을 분석하였다.

3. 열변형 해석 및 실험

3.1 고속 주축계의 모델링

주축계의 모터에 의한 발열, 베어링 발열, 냉각수 유량을 고려한 열변형 해석을 하기 위해 Fig. 1과 같이 설계된 주축계를 Fig. 2와 같이 근사화하여 모델링하고 해석에 적용할 수 있도록 3차원 요소로 나타내었다. 하였다. 베어링의 예압 정도에 따른

고속 주축의 발열은 현재의 주축으로서 고려할 수 없기 때문에 주축 조립 시 결정된 예압으로만 해석하였다.

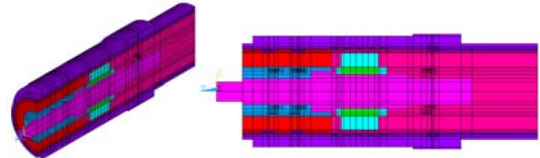


Fig. 2 3D Model of 40,000RPM spindle system

Table 1 Analysis conditions

pinde speed RPM	Preload	ooling flo rate l min
10000, 20000, 30000	5KgF	3.9

3.2 열변형 측정 장치의 구성

Fig. 1에서 설계된 고속 주축의 열변형을 측정하기 위해 아래의 Fig. 3과 같이 고속 주축의 선단부에 캡센서를 X, Y, Z축으로 설치하였다. 고속 주축의 회전 속도에 따른 온도변화를 측정하기 위해 전면 베어링에 열전대를 심어두었으며, 냉각수의 입력부와 토출부에도 각각의 열전대를 심어 온도를 측정하였다. 센서에서 출력되는 각종 데이터들을 실시간으로 취합하기 위하여 Fig. 4와 같이 LabVIEW를 이용하여 데이터 취득 프로그램을 작성하였고, 데이터취득 모듈 카드는 National Instrument 사의 SCXI-1126 모듈을 사용하였다.



Fig. 3 Installation for laboratory work

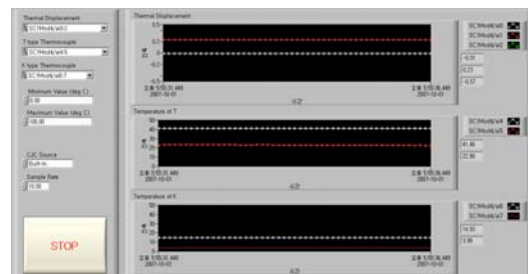


Fig. 4 Front panel of data acquisition program

3.3 주축의 회전속도에 따른 열변형 해석 및 실험

위의 Fig. 2의 유한요소모델을 Table 1과 같은 조건으로 각각 해석하였더니 Fig. 4에서부터 6까지의 결과를 얻을 수 있었다. 각각의 그림에서 왼쪽의 그림은 온도분포를 나타내고, 오른쪽 그림은 고속 주축의 축방향 열변형 정도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 내장형 모터의 고정자 부에서 최고온도가 나타나고, 그 다음 전면 베어링, 후면 베어링 순으로 최고온도가 나타남을 알 수 있다. 또한 축방향의 열변형은 주축의 회전속도가 증가함

에 따라 비선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7과 8에는 이러한 고속주축의 온도분포 및 열변형의 정도를 실제 실험을 통하여 측정된 값들을 나타내고 있다. Fig. 7에서 보면 주축의 회전수가 증가함에 따라 전면 베어링의 온도가 급격히 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 고속주축이 회전하는 동안의 X, Y, Z 축의 열변형 정도를 측정 한 데이터이다. 이 그래프를 통해 주축이 고속으로 회전 할수록 X와 Y 축의 변형보다는 Z 축의 변형이 현저하게 일어남을 알 수 있으며, 이 Z 축의 변형은 제품 가공 시 가공정밀도에 상당한 영향을 미치므로 이를 고려한 주축의 설계 및 공정설계가 필요하다. Fig. 4에서부터 6까지의 주축의 열변형 정도와 실제 실험에서 취득한 Fig. 8의 데이터를 각 속도별로 Table 2에 나타내었다. 이 표를 통해 알 수 있듯이 실험을 통해 측정된 값과 해석으로 얻은 값이 거의 일치함을 알 수 있다.

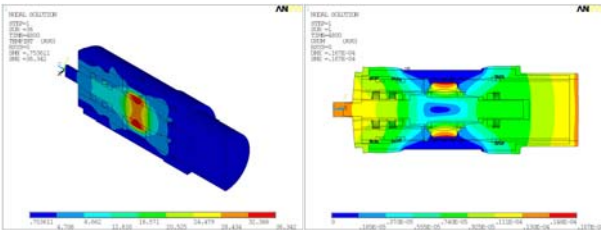


Fig. 4 Temperature distribution and thermal displacement of spindle at 10,000RPM

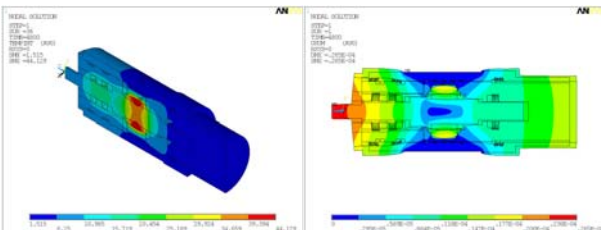


Fig. 5 Temperature distribution and thermal displacement of spindle at 20,000RPM

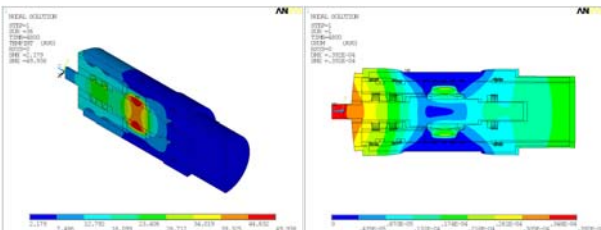


Fig. 6 Temperature distribution and thermal displacement of spindle at 30,000RPM

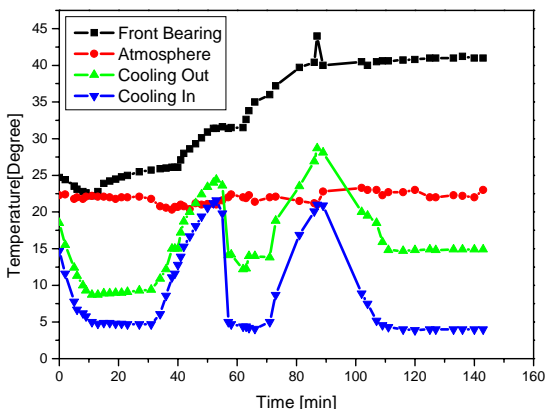


Fig. 7 Temperature variation of each part

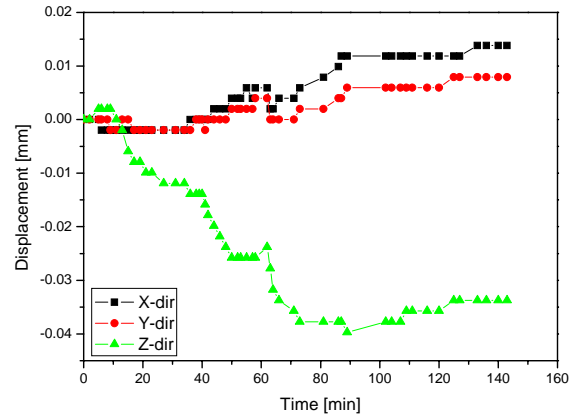


Fig. 8 Thermal displacement of X, Y and Z axis

Table 2 Comparison of simulation and experiment results

Spindle speed RPM	Experiment μm	Simulation μm
10,000	13.8	13.1
20,000	25.8	26.5
30,000	39.7	39.2

4. 결론

본 연구는 40,000RPM 고속 주축의 회전수에 따른 주축의 축방향 길이 변화를 해석과 실험을 통하여 비교함으로써, 회전수에 따른 고속 주축의 열변형 정도와 해석을 통한 예측이 가능함을 알 수 있었다. 따라서 이러한 방법을 통하여 고속주축의 열변형을 최소화하기 위한 고속 주축의 회전수, 베어링 예압, 냉각 유량의 변화에 대하여 온도분포 및 열변형을 해석을 통하여 예측할 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 임정숙, 이춘만, "40,000RPM 초고속 스피들의 베어링위치선정을 위한 유한요소해석," 한국정밀공학회 2007 춘계학술대회 논문집, 637-638, 2007.
2. 김수태, 김재실, "예압과 냉각방식에 따른 고속주축의 온도분포 및 열변형 해석," 공업기술연구논문집, 5, 13-18, 2005.
3. 김인찬, 이찬홍, "고속 주축 베어링의 조립공차에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, 177-180, 1994.