

스피닝 머신용 대형주축의 열특성에 관한 연구

정동수*(창원대학교 대학원 기계공학과), 김수태(창원대학교 기계공학과), 최대봉(KIMM),
예성봉(거백기술산업), 설상석(거백기술산업)

A Study on the Thermal Characteristics of Spindle for the Spinning Machine

D. S. Jeong(Mech. Eng. Dept., CNU), S. T. Kim(Mech. Eng. Dept., CNU), D. B. Choi(KIMM),
S. B. Ye(Geo Baek Mechanics Co., Ltd), S. S. Seol(Geo Baek Mechanics Co., Ltd)

ABSTRACT

Spinning process is a chipless metal forming method for axis-symmetric parts, which is more economical, efficient and versatile method for producing parts than other sheet metal forming process such as stamping or deep drawing. The large-sized spindle for spinning machine is the equipment to form a high-pressure vessel into the demanded shape. The important problem in the spindle system for spinning machines is to reduce and minimize the thermal effect by motor and bearings. In this study, the effect of heat generation of bearings for the large-sized Spindle is considered. Temperature distribution and thermal displacement of the spindle system for spinning machine can be analyzed by using the finite element method. The numerical results are compared with the measured data. The results show that temperature distribution and thermal displacement can be reasonably estimated by using the finite element method and the three dimensional model.

Key Words : Spinning Machine(스피닝 머신), Large-sized Spindle(대형주축), Heat Generation of Bearing(베어링 발열), Thermal Displacement(열변위)

1. 서론

스피닝 공정은 맨드릴에 관 또는 관, 튜브 등의 형상을 가진 소재를 장착하여 회전시킨 후 회전하는 소재의 표면을 축 방향과 반경 방향으로 점진적으로 누르면서 맨드릴과 같은 형상의 축대칭 원형제품을 만드는 비 절삭 점진 성형 공정으로, 비교적 복잡한 형상도 손쉽게 성형이 가능하고, 다품종 소량 생산에 적합하여 축대칭 금속제품에 널리 활용되고 있다.^{1,3}

국내의 스피닝 관련 기술은 대부분 가전산업을 위주로 한 중소형 제품의 스피닝 장비들이 주류를 이루고 있으며 대용량 고압용기의 경우 DEEP DRAWING 공법을 이용한 프레스 가공 후 연결 이음매 부위를 특수용접으로 접합하여 가공하고 대용량 고압용기의 스피닝은 해외장비를 고가에 수입하여 사용하는 수준이었다. 그러나 최근 대용량 고압용기

를 필요한 형상으로 성형하는 스피닝 머신용 대형주축의 국내기술이 확보됨으로써 수입대체 효과가 기대되고 있다.

공작기계의 가공 정밀도에 영향을 주는 주요 요인은 정특성, 동특성, 그리고 열특성이 있으며 그중에서 공작물의 가공정도 저하의 최대 요인이 되고 있는 공작기계의 열특성에 의한 열변형 문제의 개선이 중요한 과제로 부각되고 있다.

가공정도에 큰 영향을 미치는 열변형을 감소시키기 위해 공작기계의 열특성을 정확히 예측하는 것이 중요하고 또한 구조 설계에서의 열변형의 제어와 열에 의한 가공오차 보상방법의 연구가 필요하다.^{4,5} 하지만 스피닝 머신용 대형주축에 대해서는 이러한 열특성에 관한 연구가 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 스피닝 머신용 대형 주축의 실험을 통하여 주축의 회전수에 따른 주축의 온도 분포와 주축 선단부의 변위를 측정하고, 수치해석

기법을 이용하여 주축의 온도분포 및 열변형 해석을 수행함으로써 대형주축계의 열특성을 비교 분석하고자 한다.

2. 실험

2.1 대형 주축계의 구조

주축계는 주축과 외부에 장착된 모터로 구성되며 주축의 구동은 후단에 모터와 연결된 벨트에 의해서 구동된다. 주축과 가공물의 중량을 지탱하기 위해 축의 전단에는 내경이 $\phi 300$ 인 앵글러 콘택트 볼베어링 2개를 배치하고 후반부에는 내경이 $\phi 240$ 인 원통 롤러베어링 1개와 스페리컬 스트러스트 롤러 베어링 2개를 배열하였다. 윤활방식은 오일(oil bath) 윤활방식을 채택하였으며 거백기술산업에서 제작한 스피닝 머신용 대형 주축을 사용하였다. Fig. 1은 해석대상인 대형 주축계의 구조이다.

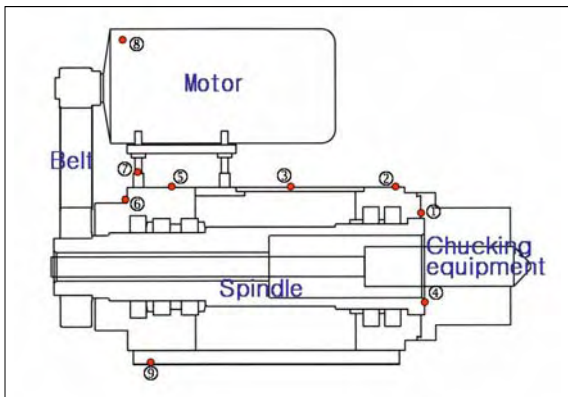


Fig. 1 Schematic diagram of the spindle system for the spinning machine

2.2 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 장비의 제원은 Table 1과 같다. Fig. 2은 실험 장치 구성의 실물사진이며, 주축에 부착된 열전대와 변위 센서의 신호는 앰프를 거쳐 데이터 획득 장치를 통해서 컴퓨터에 저장된다.

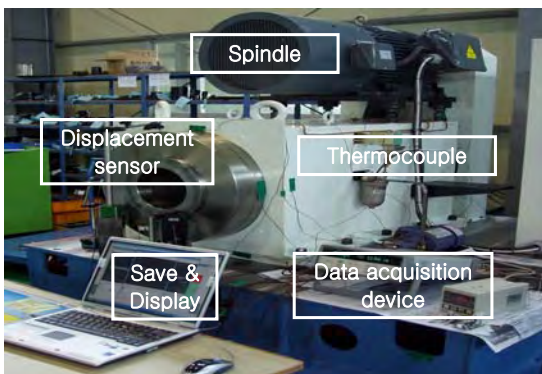


Fig.2 Photograph of the experimental setup

Table 1 Specification of the experimental equipments

Item	Specification
Spindle	the spindle for the spinning machine (Geo Baek Mechanics Co., Ltd)
Spindle speed	max 1,000rpm
Bearing	7960C, 29248E, NU1048
Bearing lubrication	Oil bath
Thermocouple	T type
Displacement sensor	Gap sensor
Data acquisition device	Hp/Agilent 34970A

주축의 온도측정 부위에는 열전대를 전반부 하우징(①, ②)에 두개, 후반부 하우징(⑤, ⑥)에 두개, 하우징의 중간부분(③)과, 모터(⑧)와 모터의 지지대(⑦), 주축의 하부(⑨)에 각각 하나씩, 총 여덟 개의 열전대를 주축의 표면에 설치하였고 주축 선단부(④)의 온도는 비접촉 적외선 온도계로 측정하였다. 변위센서는 주축의 선단부에서 x · y · z축의 변위를 측정하였으며 주축의 속도를 600rpm, 800rpm, 1,000rpm 순으로 증가 시키면서 주축의 온도 및 변위의 변화를 측정하였다.

3. 수치해석

3.1 주축계의 모델링

대형 주축계의 주축의 하중에 따른 베어링 발열을 고려하여 온도분포 및 열변형을 해석하기 위하여 다음과 같이 근사화하여 모델링을 하였다.

주축계는 열적, 구조적으로 좌우 대칭이기 때문에 1/2로 모델링을 하였고 주축계의 윤활유 공급라인, 부품과 부품의 조립부분을 생략하거나 단순화하였다. 그리고 베어링 부는 모델링을 생략하고 발열의 경계조건을 부여하였고 주축계를 구성하는 각 부품들의 상태량은 온도의존성이 없고 일정하다고 가정하였다.

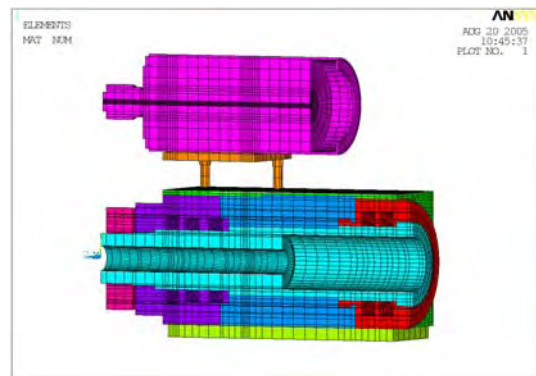


Fig. 3 FEM. model of the spindle system for the spinning machine

Fig. 3에서는 이상의 근사에 의해서 생성된 주축계의 유한요소모델을 나타내고 있으며 모델의 치수단위는 미터(m)단위로 통일하여 실물과 동일하게 모델링을 하였다. 분할요소는 Thermal-Solid70의 3차원 요소를 사용하였고, 요소의 수는 29,138이고, 절점의 수는 34,222이다.

3.2 베어링 발열특성

대형주축에서의 베어링의 발열은 베어링 형식과 하중의 크기에 의한 하중 동마찰 모멘트와 윤활유의 점도, 양과 회전수에 결정되는 속도항의 점성 동마찰 모멘트로 구분된다. 하중 동마찰 모멘트와 점성 동마찰 모멘트는 (1)과 (2)식에 의해서 계산되며 Table 2는 베어링 형식에 따른 계수를 정리한 것이다.⁶⁻⁷

$$M_{load} = f_1 P_1 d_m \quad [N \cdot mm] \quad (1)$$

여기서,

f_1 : 베어링 형식과 하중에 의해 결정되는 계수

P_1 : 하중 [N]

d_m : 피치지름 [mm]

$$M_{visc} = 10^{-7} \cdot f_0 (\nu \cdot n)^{2/3} d_m^3 \quad [N \cdot mm] \quad (2)$$

(at $\nu \cdot n > 2000$)

$$= 160 \times 10^{-3} \cdot f_0 \cdot d_m^3 \quad [N \cdot mm] \quad (2)$$

(at $\nu \cdot n \leq 2000$)

여기서,

d_m : 피치지름 [mm]

f_0 : 베어링 형식과 윤활(Oil Bath)에 따른 계수

n : 회전수 [rpm]

ν : 동 점성계수 [mm^2/s]

Table 2 Factors depending on bearing type

	Angular contact ball bearing	Cylindrical roller bearing	Thrust spherical roller bearing
f_1	$0.001(P_0/C_0)^{0.33}$	0.0002	0.00023
f_0	3.3	5	2.5

여기서 : P_0 : 정등가 하중

C_0 : 정정격 하중

총 발열량은 식(3)에서와 같이 각각의 모멘트의 합에 축의 회전수를 곱하여 계산된다.

$$Q_{total} = [M_{load} + M_{visc}] \times \frac{2\pi \cdot n}{60} \times 10^{-3} \quad [W] \quad (3)$$

4. 결과 및 고찰

주축의 회전수에 따른 주축의 온도와 열변위 측정 실험을 하였고, 모터의 발열과 풀리의 마찰열을 고려하지 않은 베어링 부위에 해당하는 부분에만 발열조건을 적용하여 해석주축계의 시간에 따른 온도 분포와 열변위를 해석하였다.

4.1 주축의 회전수에 따른 해석 및 실험 결과

Fig. 4는 주축의 회전수가 1,000rpm에서의 온도분포 해석결과이다. 전반부 하우징부에 비해 3개의 롤러 베어링에 의해 발열이 일어나는 후반부 하우징부에 최고 온도 분포가 나타난다.

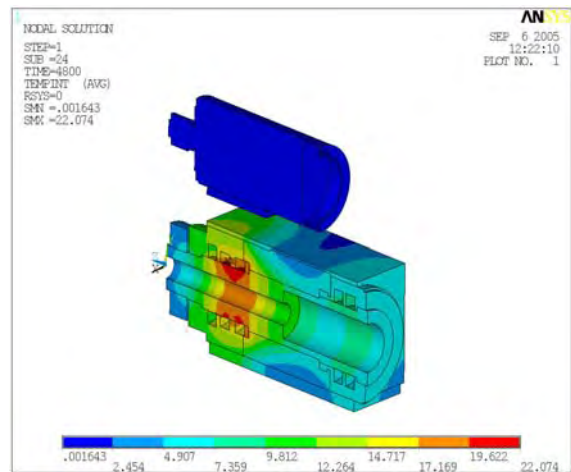


Fig. 4 Temperature distribution at 1,000rpm

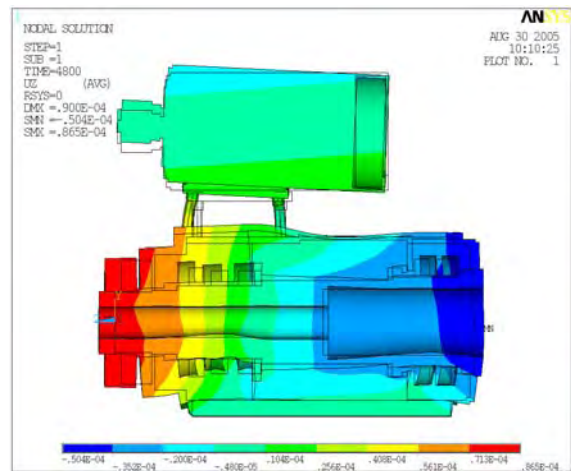


Fig. 5 Thermal displacement at 1,000rpm

Fig. 5는 주축의 회전수가 1,000rpm에서의 z축방향의 열변형 해석 결과이다. 주축의 변형은 바닥의 고정부를 중심으로 주축의 전반부는 -z축 방향으로 후반부는 +z축 방향으로 늘어남을 알 수 있다.

Fig. 6은 주축의 회전수에 따른 주축의 전반부와 후반부의 온도변화에 따른 실험결과를 나타내고 있다. 전체적으로 주축의 회전수가 증가할수록 주축계의 온도가 증가한다. 전반부 하우징부의 최고 온도는 실온에 비해 600rpm일 때 6℃, 800rpm일 때 7℃, 1,000rpm일 때 9℃로 증가하고 후반부 베어링의 최고 온도는 실온에 비해 600rpm일 때 9℃, 800rpm일 때 11℃, 1,000rpm일 때 14℃로 증가하는 것을 알 수 있다. 전반부에 비해 후반부 하우징부에서의 온도가 더 높게 나타나는 것은 주축의 하중이 후반부 베어링부에 더 크게 작용하기 때문이다.

Fig. 7은 주축의 회전수에 따른 주축 선단부의 x · y · z축방향의 변위의 변화를 나타내고 있다. 주축의 변위도 온도 분포에서와 같이 회전수의 변화에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 주축선단부의 z축 방향 변위를 비교해보면 600rpm에서 40 μm, 800rpm에서 50 μm, 1,000rpm에서 60 μm 정도의 변형을 보였다. 그리고 x · z축에 비해 y축의 진동이 크게 나타나는 것은 주축계 후단의 벨트의 장력에 의해 주축이 들리기 때문이다.

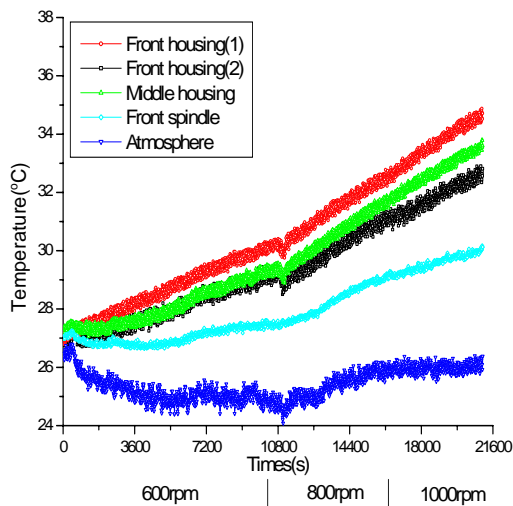


Fig. 6(a) Temperature of the front housing according to the spindle speed

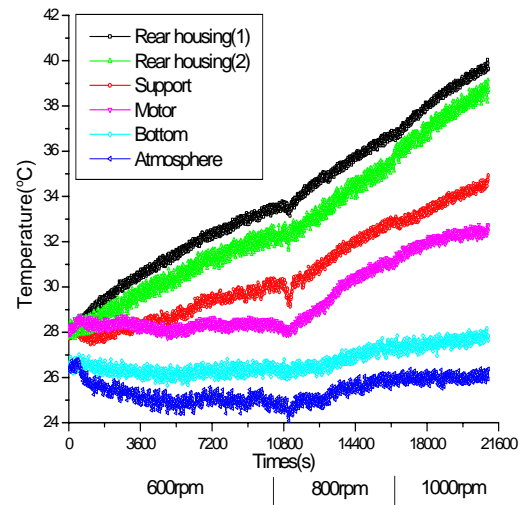


Fig. 6(b) Temperature of the rear housing according to the spindle speed

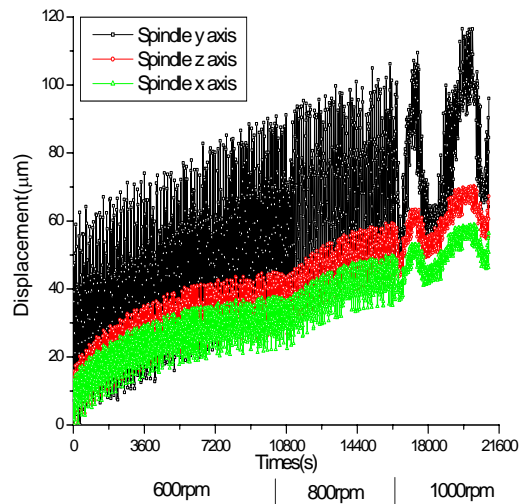


Fig. 7 Displacement of the spindle according to the spindle speed

Fig. 8과 9는 주축의 회전수에 따른 하우징부의 온도와 주축 선단부의 z축 방향 변위의 실험과 해석 결과를 비교한 것이다. 비교적 실험과 해석결과가 일치하며 이는 해석결과가 주축의 온도상승 및 열변형을 예측함으로써 스핀들 머신용 대형 주축의 설계 및 보완에 활용할 수 있음을 보여준다.

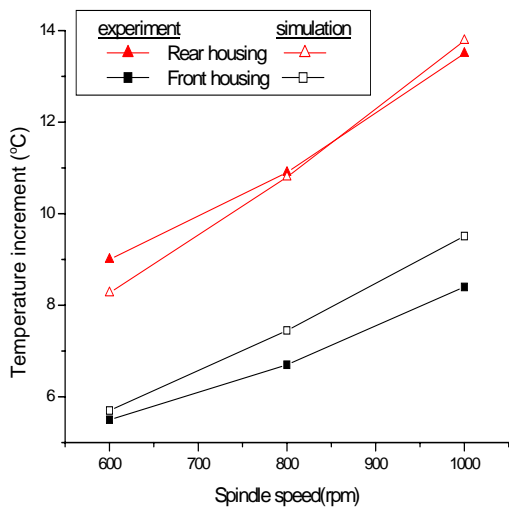


Fig. 8 Max. Temperature increment of the front and rear housing according to the spindle speed

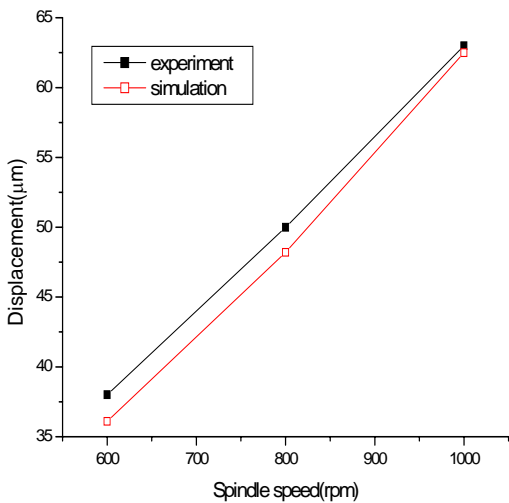


Fig. 9 Displacement of z axis according to the spindle speed

5. 결론

본 연구는 스피들 머신용 대형주축의 온도분포와 열변위 특성을 알아보기 위하여, 주축의 회전수에 대한 열특성 실험을 수행하였다. 유한요소법을 해석 기법으로 하는 프로그램을 사용하여 열전달을 고려한 대형주축계의 온도분포 및 열변형을 해석하고 실험과 수치해석값을 비교 검토함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주축의 회전수의 증가에 따라 주축계의 변위와 온도도 증가하였으며 주축의 전반부에 비해 큰 하중을 받는 후반부 하우징부에 높은 온도분포가 나타났다.

(2) 주축의 회전수와 베어링 발열을 고려하여 열전달 해석을 수행한 수치해석 결과와 실험의 경향이 일치함을 알 수 있었다.

(3) 유한요소법을 사용하여 대형주축계의 비정상 열전달 해석을 수행한 결과 이론적으로 온도 분포 및 열변형을 추정하는 것이 가능함을 확인하였다.

후기

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

참고문헌

1. S, Kalpakciogbu., J. of Engrg. for Industry, Trans, ASME, 125, 1961.
2. S, Kalpakciogbu., J. of Engrg. for Industry, Trans, ASME, 478, 1961.
3. 박중언, 이우영, 최석우, 김승수, 나경환, “스피닝 공정에 있어서 스프링백 억제방안”, 한국 정밀공학회지 제18권 제9호, 2001.
4. DaeBong CHOI, SooTae KIM, SungHun JUNG, YongKee KIM, "Thermal Characteristics of the High Speed Motor Spindle by the Variation of Bearing Preload and Cooling Conditions.", Machine engineering, Vol. 4, No. 1-2, 2004.
5. 백경근, 김수태, 최대봉, 김태형, “모터내장형 고속 주축계의 열특성 해석에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.138~143, 2000.
6. "FAG 공작기계용 스피들 베어링“, FAG Catalog WL41 520/2KA.
7. Tedric A. Harris, "Rolling Bearing Analysis", John Wiley & Sons, Inc., 2001.