

# 복합가공 CNC 자동선반의 운전속도에 따른 가이드부쉬 시스템의 열변형량 예측

## Thermal Displacement Estimation of The Guide-bush System According to Operation Speed of The Multi-task CNC Lathe

\*이수민, 이재훈, #이시복

\*S.M. Yi, J.H. Lee, #S.B. Lee(sblee@pusan.ac.kr)  
부산대학교 기계공학부

Key words : CNC automatic lathe, Guide-bush system, Temperature distribution, Thermal displacement

### 1. 서론

최근 공작기계의 발전경향은 고속화, 고정도화, 고강성에 초점을 두고 있으며, 가공조건을 더욱 고속화시켜 단위시간에 보다 많은 제품을 만들고 단위 기계의 자동화를 통하여 무인운전, 나아가 공장 자동화로 발전하고 있다. 시스템이 고속화, 소형화, 경량화 됨에 따라 효율이 좋아지는 반면, 주축부 및 가이드부쉬부에서의 소음, 진동 및 열 발생 등과 같은 근본적인 문제가 대두되고 있다. 주축부는 열특성에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔으나 CNC 자동선반에 필수요소인 가이드부쉬 시스템에 관한 연구는 부족하다. 특히 소형 경량화 제품의 고속 가공시에 발생하는 가이드부쉬부의 온도상승은 열변위를 일으켜 가공정밀도에 영향을 주며, 구성하고 있는 부품간의 상이한 열팽창량으로 열응력을 발생시켜, 마찰 및 마모를 증대시켜 부품의 수명을 단축시킨다. 공작기계의 성능은 최고 회전속도에 의해 결정되며, 최고 회전속도는 베어링에서 발생하는 온도 상승량에 의해 제한을 받는다. 그러므로 가이드부쉬부의 열발생을 억제하기 위한 냉각계 및 윤활기구 등의 개발에 대한 연구가 필요하며, 이를 위해 열발생을 최소화 할 수 있는 구조설계의 최적화가 선결되어야 한다. 가이드부쉬 시스템의 온도분포 및 그에 따른 열변형량을 예측하여 구조설계의 최적화에 활용하려 한다.

### 2. 가이드부쉬 시스템

가이드 부쉬 시스템은 주축이 소재와 함께 회전을 하며 가공을 할 때 소재의 처짐을 방지하는 역할을 한다. Fig. 1 (a)은 가이드 부쉬의 전체도이다. Fig. 1 (c)의 일반 선반은 주축이 소재와 함께 회전만 할 뿐 이동은 없다. 소재의 가공부를 길게 하여 가공할 경우 처짐이 발생하므로 소재를 짧게 하여 가공을 해야하며, 이는 생산의 효율성을 떨어뜨린다. Fig. 1 (d)의 자동선반의 경우 소재의 빠르고 효율적인 가공을 위해 소재의 가공부를 길게 하여 주축이 소재와 함께 회전 할 뿐 아니라 회전축 방향으로 이동한다. 이때 공구가 가공을 할 경우 처짐이 발생하게 되는데 이를 방지하기 위해 가이드부쉬 시스템을 사용한다. 가이드 부쉬는 Fig. 1 (b)와 같이 소재와의 마찰을 최소화하기 위해 스핀들과 같은 회전 속도로 회전한다.

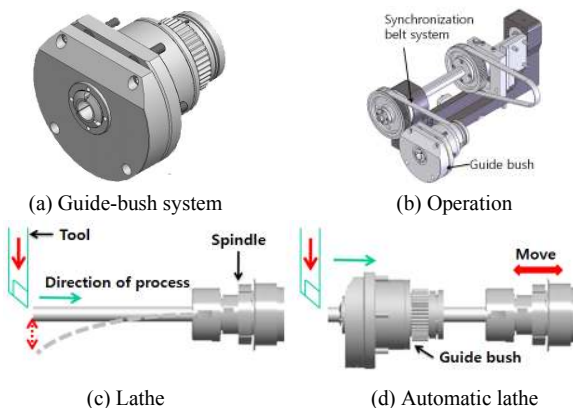


Fig. 1 Guide-bush system

### 3. 해석

유한요소법(Finite Element Method)을 해기법으로 하는 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 가이드부쉬 시스템의 온도 분포 해석을 수행하였다. 해석모델은 Solidworks를 이용하여 실제 제품과 동일하게 모델링되었다. Table 1에 해석에 적용된 실제 부품별 물성치를 정리하였다. 가이드부쉬 시스템의 열 해석에 사용된 경계조건은 다음과 같다. 하우징 표면은 외부 공기와의 자유 대류로 하고, 대류계수는  $20(W/m^2K)$ 로 하였다. 발열원은 베어링의 회전에 의해 발생하는 베어링 내·외륜과 볼의 마찰에 의한 마찰열이다. 발열량은 유한요소모델에서 베어링에 상당하는 위치에 열원(Heat source)를 부여하는 것으로 베어링의 마찰에 의한 온도 상승량을 구하였다. 각 베어링의 내륜, 외륜 및 볼을 포함하여 전체에 균일한 발열을 가정하였다. 회전운동을 하는 주축을 지지하는 앵글러 콘택트 베어링은 축방향 하중(axial load)와 반경방향 하중(radial load)을 동시에 받는다. 이 베어링의 발열은 스핀모멘트와 자이로스코픽모멘트, 하중에 의한 동마찰모멘트, 그리고 점성 동마찰 모멘트로 구분된다. 본 연구에서 스핀모멘트에 의한 발열은 전체 베어링 발열에 큰 영향을 미치지 못하므로 이를 제외하여 발열량을 계산하였다. Table 2는 운전속도(rpm)별 베어링의 발열량을 보여준다.

Table 1 Property of materials

Material	Thermal conductivity (W/m°C)	Thermal expansion (1/°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kg°C)	Young's modulus (Pa)
SM45C	51.9	$1.2 \times 10^{-6}$	7850	434	$2.05 \times 10^{11}$
SCM440	42.7	$1.07 \times 10^{-5}$	7833	450	$2.1 \times 10^{11}$
SUJ2	54	$1.25 \times 10^{-5}$	7833	420	$2.08 \times 10^{11}$
M-Bronze	9.6	$2.2 \times 10^{-5}$	83000	380	$1.1 \times 10^{11}$
Brass	110	$1.8 \times 10^{-5}$	500	390	$1.0 \times 10^{11}$

Table 2 Heat generation of angular contact bearing

Operation speed (rpm)	Heat generation (W)
1000	2.20
3000	6.62
5000	11.04
7000	15.46

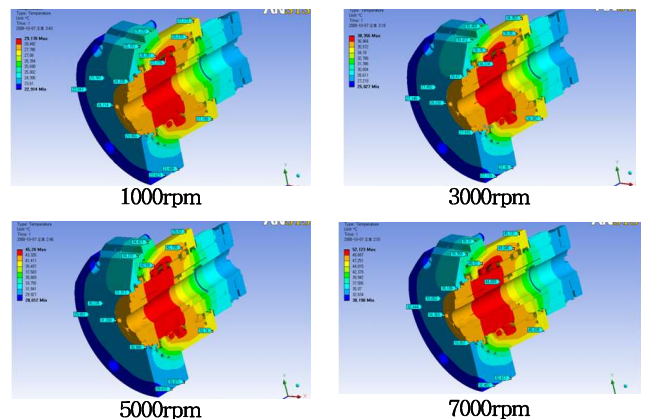


Fig. 2 Temperature distribution (FEM)

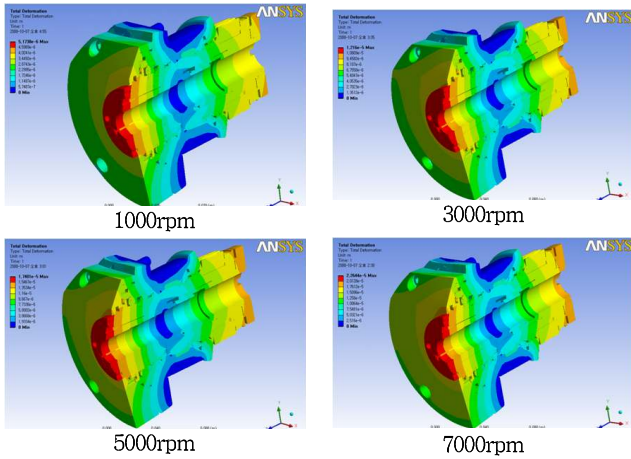


Fig. 3 Thermal displacement (FEM)

Table 3 Thermal displacement

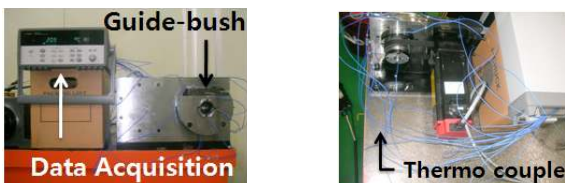
	X-axial( $\mu\text{m}$ )	Y-axial( $\mu\text{m}$ )	Z-axial( $\mu\text{m}$ )	Total ( $\mu\text{m}$ )
1000 rpm	2.45	2.42	5.10	5.17
3000 rpm	6.36	5.62	11.98	12.16
5000 rpm	9.30	8.10	17.15	17.40
7000 rpm	12.23	10.60	22.32	22.64

가이드 부쉬 시스템을 공회전 시키면서 열적 정상상태에 도달했을 때의 각 부분의 온도분포를 알기 위해서 Steady-state thermal analysis를 수행하였다. 1000rpm, 3000rpm, 5000rpm, 7000rpm의 운전속도에 대해서 하우징 표면에서의 자유대류 조건과 Table 2에 제시된 베어링 발열량을 적용하여 해석을 수행하였다. Fig. 2에서 운전속도에 따른 온도 분포의 결과를 보여준다. 1000rpm에서 25~29℃의 분포를 보였고, 3000rpm에서 28~37℃, 5000rpm에서 31~41℃, 7000rpm에서 33~48℃의 온도분포를 보였다.

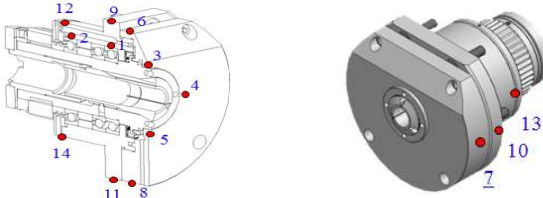
온도 분포에서 얻은 각 절점의 온도를 통해 열변형 해석을 수행하였다. 가이드부쉬 시스템의 온도상승은 크게 높지 않고, 또 온도의 변화도 거의 급격하지 않으므로, 열변형은 정적 탄성변형의 범위에 포함된다. Fig. 3는 열변위 해석을 수행한 결과이다. 열변형 해석은 가이드 부쉬부의 각 축방향의 열변형을 파악하고 보정을 통해 가공정밀도를 향상시키는데 목적이 있다. Table 3은 운전속도별 무부하 회전에 의한 발열이 열변형에 미치는 결과이다. X축과 Y축의 열변위는 비슷한 수치를 보였으며, Z축은 다른 축의 2배 가량 큰 열변위를 보였다. 가이드 부쉬의 축방향 열변형이 운전속도와 선형적 비례관계가 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 실험

FEM을 통해 구한 온도분포의 검증에 위해 실험을 수행하였다. 가이드부쉬 시스템은 주축에 벨트를 걸어 같은 회전속도로 가동되지만, 실험을 위해 최대회전수 10000rpm인 CNC를



(a) Photograph of the experimental setup



(b) Schematic diagram of measurement positions

Fig. 4 Experimental setup

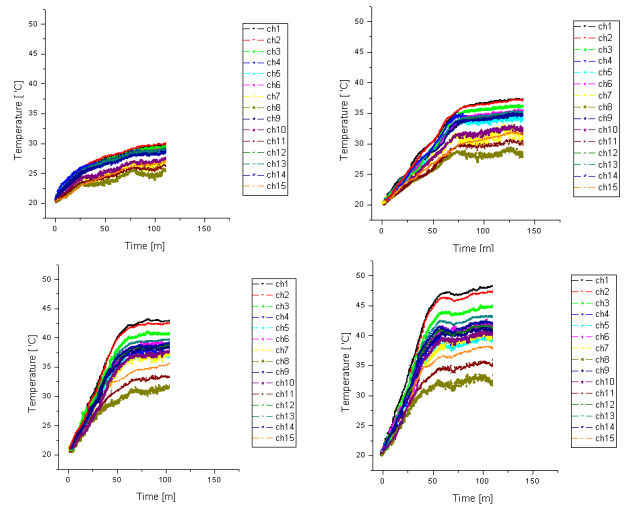


Fig. 5 Temperature distribution (experiment)

이용하여 속도 제어가 가능한 모터에 벨트를 체결하여 실험용 가이드부쉬 시스템을 구성하였다. 본 실험의 구성도는 Fig. 4 (a)와 같다. 가이드부쉬 시스템에 부착된 열전대의 신호를 Data acquisition 장치를 이용하여 앱 및 A/D 변환작업을 하여 PC에 데이터를 저장하였다. 센서의 위치는 Fig. 4 (b)와 같이 베어링의 외륜부를 포함하여, 총 15곳에 부착하여 실험을 진행하였으며, 실온이 20도로 유지 가능한 항온항습실에서 실험이 진행되었다.

운전속도에 따른 온도분포를 Fig. 5에 정리하였다. 운전속도가 상승함에 따라 정상상태에 도달하는 시간이 줄어드는 경향을 보이며, 최고온도와 최저온도의 차이가 커, 큰 온도분포를 가짐을 확인할 수 있었다. FEM을 통해 해석한 결과와 비슷한 결과를 확인할 수 있었지만 실험을 위해 제작된 고정대에 의한 열전달, 가이드 부쉬를 회전시키는 모터의 발열과 모터의 동력을 가이드 부쉬 시스템에 전달 해 주는 벨트의 영향 등이 FEM에서의 모델링과 차이가 있어 오차가 발생했을 것이라 예상된다.

#### 5. 결론

온도 분포에 대한 실험과 해석 결과의 경향이 일치함을 알 수 있었고, 이를 바탕으로 온도상승으로 인한 열변형을 예측할 수 있었다. 가이드 부쉬 시스템의 온도측정 실험결과 및 해석을 통해 나타난 것처럼 회전속도에 따라 온도분포가 커지고, 그에 따른 열변형량의 폭 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 열변형의 크기는 베어링의 발열량에 비례하고 있는 것을 알 수 있었다. 동작기계의 발전방향이 고속화, 소형화 됨에 따라서 더 큰 온도상승이 예측되고, 가공물이 정밀화 됨에 따라 더 작은 열변위도 가공정밀도에 큰 영향을 미칠 것을 예상 할 수 있다. CNC 자동선반에 필수요소인 가이드부쉬 시스템의 열변형량을 미리 예측함으로써 설계상의 보정을 통하여 가공정밀도를 향상시키는 데에 기여할 수 있을 것이다.

#### 후기

본 연구는 한국 산업기술재단에서 주관하는 지역혁신인력양성교체의 일환으로 수행되었다.

본 연구는 미래핵심 기계부품소재 산학공동사업단에서 주관하는 기술개발교체의 일환으로 수행되었다.

#### 참고문헌

1. T. A. Harris, "Rolling Bearing Analysis", John Wiley & Sons, Inc., 1991
2. Frank Kreith, Mark S. Bohn, "Principles of heat Transfer", West Info Access.
3. 김용길, 김수태, "모터내장형 주축의 온도분포해석에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회지, 619-623, 1993