

◆특집◆ 지능형 연삭 가공 시스템 I

페룰가공용 동축 연삭기 주축계의 열특성 해석

정일용*, 최영재*, 이근범**, 편영식***

A Study on Thermal Analysis of Spindle System for Ferrule Grinding Machine

I. Y. Chung*, Y. J. Choi*, K. B. Lee** and Y. S. Pyoun***

Key Words : Machine Tool (공작기계), Spindle System (주축계), Thermal Analysis (열해석), Ferrule (페룰)

1. 서론

광통신망 구축에 있어 광섬유의 접속을 위한 광접속기 소자의 하나로 광섬유 정렬의 핵심부품인 페룰이 있다. 광페룰은 통신품질의 향상에 따라 고정밀도의 품질수준을 요구되고 있으며, 이러한 광부품인 페룰을 가공하기 위해서는 동축연삭기의 초정밀 초미세 가공설비가 요구되고 있다. 이러한 광페룰가공용 초정밀 연삭기의 경쟁력을 확보하기 위해서는 부하시 절삭력 또는 절삭토크의 영향을 받지 않고 운전시의 열적 영향을 최대한 배제할 수 있는 고정밀, 고강성의 주축계가 요구된다. 동축연삭기의 고속회전으로 인한 주축계의 발열은 열변형에 의한 주축의 정밀도를 저하시키고 주축베어링의 수명을 단축시킨다. 국내에서도 상용프로그램을 이용한 공작기계 주축계의 열특성 해석에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며^{1,2,3} Zevrev 등은 주축의 열해석 모델을 1 차원 요소로 단순화시키는 방법을 개발하였다.⁴

본 연구에서는 페룰가공용 동축연삭기 주축계의 열특성을 해석하였다. 주축계의 열해석은 상용 유한요소해석기인 ANSYS 6.1 을 이용하여 하우징

및 연삭휠이 포함된 주축계 해석모델에 대해 정상상태와 과도상태에 대한 3 차원 열해석을 수행하였으며 Zevrev 의 열해석 모델에 의한 열해석 결과와 비교하였다.

2. 주축계의 유한요소해석

2.1 베어링의 발열

주축계에 사용된 베어링은 앵글러 볼베어링으로 베어링에서의 마찰손실이 전부 발열에너지로 전환된다고 가정하면, 베어링의 발열은 베어링의 마찰손실과 회전수의 함수로 결정되어 진다.

Q_B = Q_B(M_F, n) = (2π/60) · n · M_F (1)

여기서 Q_B는 베어링의 발열량이며, M_F는 베어링 마찰토크, n는 주축 회전수이다.

베어링 마찰토크는 Palmgren 의 관계식에 의해 다음과 같이 주어진다.

M_F = M₀ + M₁ (2)

여기서 M₀는 하중과는 관련없이 회전수와 관련된 마찰토크의 동압(hydrodynamic)성분이고, M₁는 회전수와 관련없이 하중과 관련된 하중(load)성분으로 나눌 수 있다.

M₀ = 10⁻⁷ · f₀ · (v · n)^{2/3} · d_m³ (if v · n ≥ 2000); (3)

* 한국생산기술연구원
Tel. 041-589-8434, Fax. 041-589-8400
Email ciy@cupid.kitech.re.kr
** 청주기능대학 컴퓨터응용기계과
*** 선문대학교 기계 및 제어공학부

$$M_0 = 160 \cdot 10^{-7} \cdot f_0 \cdot d_m^3 \quad (\text{if } v \cdot n < 2000) \quad (4)$$

여기서 d_m 는 평균베어링 지름[mm], f_0 는 베어링 유효타입에 관한 계수이며, v 는 온도에 따른 유효동점성계수[cSt]이다. 또한 하중성분의 마찰도 오코 M_1 는

$$M_1 = f_1 \cdot P \cdot \left(\frac{P}{C_0}\right)^c \cdot d_m \quad (\text{for ball bearings}) \quad (5)$$

$$M_1 = f_1 \cdot P \cdot d_m \quad (\text{for roller bearings}) \quad (6)$$

여기서 P 는 베어링에 적용된 등가하중[dN], C_0 는 베어링 정하중[dN], c 와 f_1 는 각각 베어링의 타입에 대한 하중계수와 타입계수이다.

위의 관계식을 이용하여 베어링에서의 발열량을 계산한 결과는 다음과 같다.

Table 1 Heat generation rate of bearings

Bearings	Heat emission(capacity), [W]		
	1,000 rpm	5,000 rpm	10,000rpm
1 st bearing	2.5	23.3	54.0
2 nd bearing	2.4	23.1	53.2
3 th bearing	2.4	23.0	53.0
4 th bearing	2.4	23.0	52.8
5 th bearing	1.9	18.4	42.2
6 th bearing	1.9	18.4	42.2

2.2 주축계의 해석 모델링

페룰가공 동축연삭기의 주축계를 구성하고 있는 주축, 베어링, 베어링하우징, 연삭휠, 풀리, 하우징 등을 모델링한 그림은 Fig. 1 과 같다.

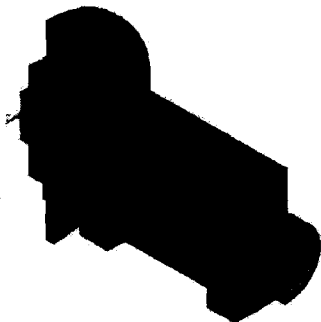


Fig. 1 Modeling of Ferrule Grinding Machine

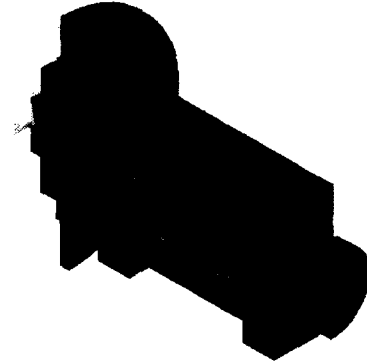


Fig. 2 Mesh generation of Grinding machine

모델링은 대칭을 고려하여 전체형상의 1/2 만을 모델링하였다. 이는 하우징을 제외한 나머지 부분은 축대칭이고, 하우징 부분은 축대칭이 아니라 좌우대칭이다. 페룰가공 동축연삭기의 주축계를 해석하기 위해서 범용 유한요소해석프로그램인 ANSYS 6.1 을 이용하였다. 해석모델은 3 차원 솔리드 요소(SOLID90)을 사용하여, 40,474 개의 요소와 61,145 개의 절점의 사면체요소로 이루어졌다. 해석에 사용된 주축계의 물성치를 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Material properties of spindle unit

	Material	Thermal conductivity [W/m°C]	Density [kg/m³]	Specific heat [J/kg°C]
spindle	SM415	44.5	7830	473
bearing	SUJ2	50	7830	460
bearing housing	SM45C	44	7800	470
bearing case	FCD350	36	7100	461
housing	GC250	48.5	7250	460
grinding wheel	SUS	25	7470	460
pulley... others	SM45C	50	7830	460

해석을 위한 가정으로는 부품간의 열 접촉저항은 무시하였으며 복사에 의한 열전달은 무시하였다. 또한 베어링부의 발열은 베어링의 내륜과 외륜사이의 사각단면에서 발생한다고 가정하였다. Zevrev 에 의하면 연삭기의 주축계 표면에서 대류 열전달계수는 자연대류에서 20[W/m²°C]와 강제대류에서 200[W/m²°C]이내로 가정하였다. 본 열해석

에서도 이를 바탕으로 하우징 표면에서는 자연대류로 가정하고, 연삭휠과 폴리부분에서는 강제대류로 가정하였다. 또한 주축계 하우징의 하단부는 동축연삭기에 장착된 상태로 가정하여 20°C 로 일정하다고 가정하였으며 대류해석을 위한 주변온도 및 초기온도는 20°C 로 가정하였다.

3. 열해석 결과 및 고찰

3.1 정상상태의 온도분포 해석

동축연삭기의 주축회전수 1,000rpm, 5,000rpm, 10,000rpm 에 대한 정상상태에서의 열전달 해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 주축회전수가 증가함에 따라 베어링 부위에서의 온도는 증가하고 있으며, 주축 전단부보다는 후반부에서 온도가 더 높다는 것을 알 수 있다. 이는 모

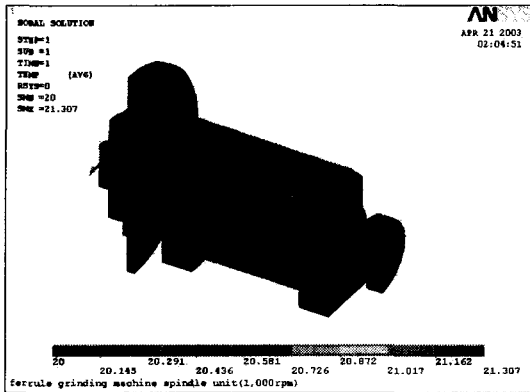


Fig. 3(a) Thermal distributions at 1,000 rpm

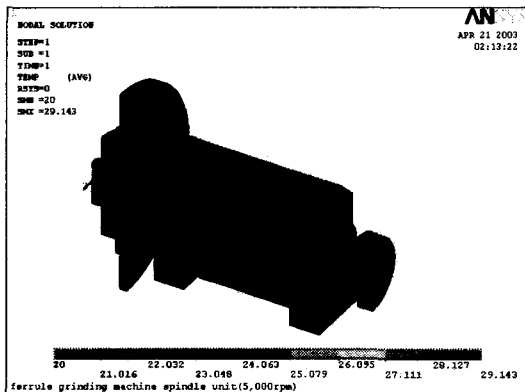


Fig. 3(b) Thermal distributions at 5,000 rpm

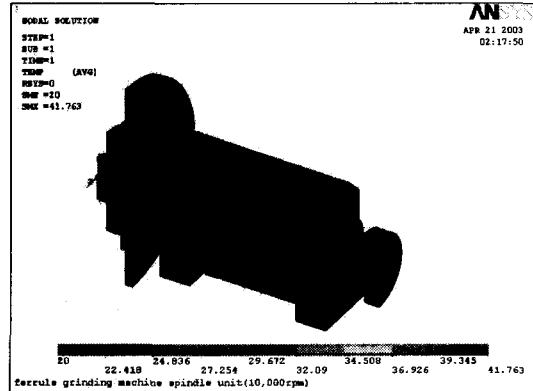


Fig. 3(c) Thermal distributions at 10,000 rpm

터 폴리를 위한 베어링이 인접하게 위치하고 있음에 기인한다. 또한 베어링부위에서 발생한 열은 축방향으로 전달되는 것을 알 수 있다. 이는 주축계의 전단부와 후반부에는 주축의 회전에 의한 대류열전달에 의한 열흐름이 많이 일어나고 있기 때문이다.

베어링부위에서의 평균온도를 Zevrev 의 열해석 모델로 해석한 결과와 비교하면 Table 3 과 같다. 표에서 보듯이 베어링 전단부의 온도는 후반부의 온도에 비해 약간 차이가 있으나 이것은 연삭휠쪽으로 열전달이 많이 일어나는 것에 기인한다고 볼 수 있으며 대체적으로 두 결과는 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Temperature comparison

Bearings	Temperature[°C]					
	1,000rpm		5,000rpm		10,000rpm	
	Zevrev	ANSYS	Zevrev	ANSYS	Zevrev	ANSYS
1 st	21.1	20.8	29.7	26.0	39.7	33.9
2 nd	21.1	20.8	29.8	26.2	40.2	34.4
3 th	21.1	21.2	29.7	28.2	40.0	39.4
4 th	21.1	21.2	29.6	28.5	39.4	40.3

3.2 과도상태의 열해석

시간에 따른 주축계의 온도상승량을 알아보기 위해 과도상태에서의 열전달해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 주축계에서는 약 50 분 후에는 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

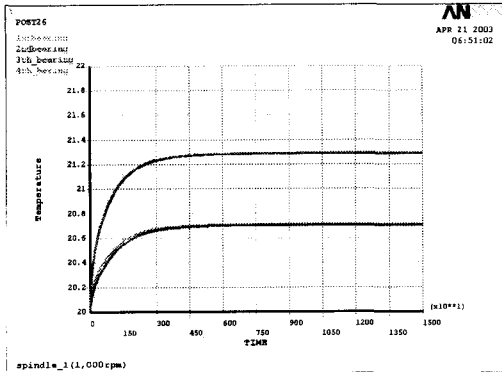


Fig. 4(a) Temperature rise at 1,000 rpm

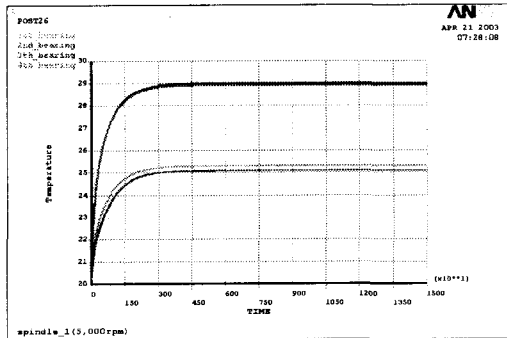


Fig. 4(b) Temperature rise at 5,000rpm

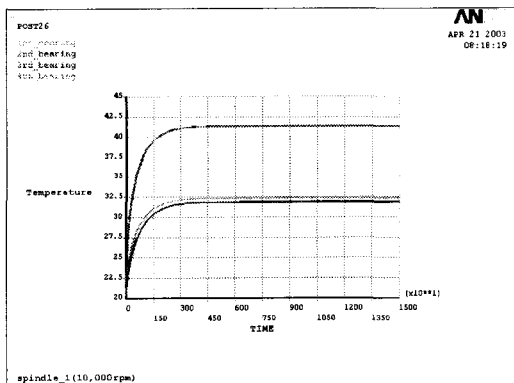


Fig. 4(c) Temperature rise at 10,000rpm

4. 결론

본 연구에서는 광패를 동축가공 연삭기 주축 계에 대해 정상상태와 과도상태에서의 열전달 해

석을 수행하였다. 열해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 과도상태 해석결과 주축계는 초기에 급격한 과도상승이 이루어지다 약 50 분 후 정상상태에 도달하였다.
- 2) 베어링부위의 온도는 Zevrev 의 열해석 모델에 의한 결과치와 거의 일치함을 알 수 있었다.
- 3) 주축의 후단부에 위치한 베어링은 모터풀리를 지지하는 베어링과 인접해 있으므로 이부분의 열발생이 전단부에 비해서 상대적으로 높다.
- 4) 하우징 표면에서의 온도는 5,000rpm 일 경우 약 5°C 증가하였으며, 10,000rpm 일 경우 주위온도에 비해 약 10°C 정도 증가하였으며 후단부로 갈수록 온도가 상승하는 경향을 보인다.
- 5) 연삭휠과 폴리부위에서의 열전달율을 좀더 정확히 예측할 필요가 있으며, 실험을 통하여 해석결과와의 검증이 요구된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 “고기능성 부품용 지능형 연삭시스템개발”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김수태, 최대봉, 조환석, “고주파모터내장형 주축의 냉각특성에 따른 열해석,” 한국정밀공학회 2002 추계학술대회, pp. 969~974, 2002
2. 임영철, 김중관, “공작기계 주축 거동시 온도분포특성에 관한 연구,” 한국정밀공학회 2002 추계학술대회, pp. 980~984, 2002.
3. Zevrev, “Thermal Model of High speed Spindle Units”
4. 중기거점 “반도체 및 광산업 부품가공용 지능형 고정밀 주축개발,” 1 차년도 보고서, 산업자원부, 2002.
5. 편영식 외, “폐물가공용 고정밀 주축 시스템 설계,” 한국정밀공학회 2002 춘계학술대회, pp. 15~19, 2002.