

페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기의 열 특성 해석

김석일* (한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부), 조재완 (한국항공대학교 대학원)

Thermal Characteristic Analysis of a High-Precision Centerless Grinding Machine for Machining Ferrules

S.I. Kim (School of Aerospace and Mechanical Engineering, HAU) and J.W. Cho (Graduate School, HAU)

ABSTRACT

To perform the finish outside-diameter grinding process of ferrules which are widely used as fiber optic connectors, a high-precision centerless grinding machine is necessary. In this study, the thermal characteristics of the high-precision centerless grinding machine such as the temperature distribution, temperature rise and thermal deformation, are estimated based on the virtual prototype of the grinding machine and the heat generation rates of heat sources related to the machine operation conditions. The reliability of the predicted results is demonstrated by the temperature characteristics measured from the physical prototype. Especially, the predicted and measured results show the fact that the high-precision centerless grinding machine consisted of the hydrostatic GW and RW spindle systems, hydrostatic RW feeding mechanism, RW swivel mechanism, on-machine GW and RW dressers, and concrete-filled steel bed, has very stable thermal characteristics.

Key Words : High-precision centerless grinding machine (초정밀 무심 연삭기), Grinding wheel (GW, 연삭 슯돌), Regulating wheel (RW, 조정 슯돌), Hydrostatic bearing (유정압 베어링), Thermal characteristic analysis (열 특성 해석), Thermal imaging camera (열 화상 카메라), Thermo-couples (열전대), Ferrule (페룰)

1. 서론

광 커넥터의 핵심 부품인 페룰은 광통신 정보의 전송 효율과 품질 향상을 위해서 내경을 기준으로 한 외경 연삭 공정이 필수적인 마무리 공정의 하나로 요구되고 있다. 또한 페룰은 대부분 세라믹 재료인 지르코니아(ZrO_2)로 제작되고 있고, 페룰의 요구 정밀도는 $1\ \mu m$ 이하이며, 특히 내·외경 치수 정밀도와 원통도는 매우 엄격히 규제되고 있다.

이러한 페룰의 외경 연삭을 효율적으로 수행하기 위한 최선의 방안은 작업자의 숙련도와 관계 없이 초정밀 부품을 고능률적으로 가공할 수 있는 무심 연삭기의 적용이다. 특히 무심 연삭기에서의 제품 정밀도는 전적으로 기계의 가공 정밀도에 의해서 좌우되기 때문에 페룰 외경의 초정밀 가공을 위해서는 그에 대응되는 초정밀 무심 연삭기의 개발이 필요하다. 그리고 초정밀 무심 연삭기를 구현하기 위해서는 구조적 안정성에 대한 확보 외에도 열적 안정성에 대한 확보가 매우 중요하게 된다.

페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기를 구현하기 위해서 요구되는 성능과 기능들에 대한 검토는 Cho 등¹에 의해서 수행되었다. 그리고 Park 등²은 초정밀 무심 연삭기용으로 제작한 유정압 이송계의 강성, 운동 정밀도, 미소 분해능, 위치 결정 오차 및 반복 오차를 실험적으로 파악하고 그 적용 가능성을 분석하였다. Kim 등³은 강제 베드, 유정압 안내 방식, 서보 모터-볼 스크류 구동 방식 등을 적용해서 구성한 초정밀 무심 연삭기의 이송계에 대한 구조 해석과 실험을 통해서 구조 설계의 타당성을 검토 및 평가하였으며, 특히 페룰의 가공 정밀도와 밀접하게 관련된 이송계의 축 방향 강성, 수직 방향 강성 등에 대한 구조 요소들의 영향을 분석하여 실험적으로 파악하기 어려운 강성 저하 원인을 규명하였다. 또한 Kim 과 Cho⁴는 자중과 연삭력이 초정밀 무심 연삭기의 구조 변형에 미치는 영향을 해석하였으며, 연삭력에 의해서 야기되는 GW 와 RW 사이의 상대 변위를 토대로 초정밀 무심 연삭기의 루프 강성을 평가하였고, 특히 강제 베드 내

에 콘크리트를 충전한 경우와 충전하지 않은 경우를 비교 분석함으로써 콘크리트 충전 베드의 적용이 초정밀 무심 연삭기의 고강성화 및 고정밀화에 상당 수준 기여한다는 사실을 입증하였다. 이와 같이 페를 가공용 초정밀 무심 연삭기와 관련된 기존 연구들은 모두 구조적인 관점에서 문제를 검토하고 평가한 것들로 열적인 관점에서 문제들을 검토하고 평가한 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구는 구조 특성과 더불어서 페를 가공용 초정밀 무심 연삭기의 연삭 성능에 큰 영향을 주는 열 특성을 평가하는 데 그 목적을 두었다. 이를 위해서 GW·RW 주축계, RW 이송계, RW 선회대, GW·RW의 기상 드레서, 콘크리트 충전 베드 등으로 구성된 초정밀 무심 연삭기의 열 해석 모델은 ANSYS를 이용해서 구축하였고, GW·RW 주축계의 유정압 베어링, 벨트 풀리, 풀리 서포트 베어링, 모터 등과 같은 열원들에 대한 열 전달률 해석과 함께 대기와의 접촉면, 베드 상의 냉각수 유로 등에서의 대류 열 전달에 의한 냉각 효과를 고려하였다. 특히 초정밀 무심 연삭기의 열 특성은 운전 상태에서의 온도 분포, 온도 상승, 열 변형 등을 토대로 분석하였고, 이러한 해석 결과의 신뢰성은 열 화상 카메라와 열전대를 이용해서 측정된 온도 특성과의 비교 분석을 통해서 입증하였다.

2. 초정밀 무심 연삭기의 구조 및 제원

2.1 연삭기

Fig. 1은 본 연구의 해석 대상인 페를 가공용 초정밀 무심 연삭기의 기본 구조를 보여주고 있다. GW 주축대는 베드의 좌측 상면에 설치하였고, 페를의 이송 속도를 조절하기 위한 RW 선회대가 부

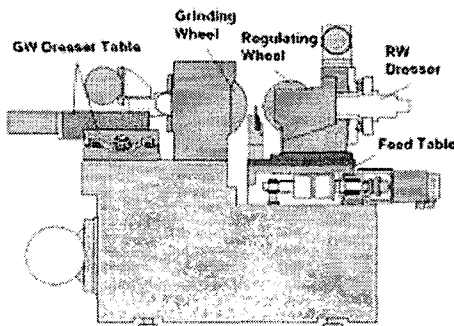


Fig. 1 Scheme of grinding machine

Table 1 Specification of ferrule

Dimension	2.5×10 mm	Accuracy	0.2 μm
Material	ZrO ₂	Roundness	0.1 μm
Roughness	0.5 μm R _a	Cylindricity	0.5 μm

착된 RW 주축대는 베드의 우측 상면에 설치한 이송 테이블 위에 위치하고 있다. 또한 GW와 RW의 기상 드레싱을 위한 전용 드레서들을 각각 GW 주축대와 RW 주축대 후면에 위치시킴으로써 구조의 단순화와 연삭 작업의 효율화를 도모하였으며, 기계 구조의 고강성화를 위해서 강재 베드의 내부를 콘크리트로 충전하였다.

Table 1과 같은 제원의 페를을 10 개씩 동시 가공할 수 있도록 GW의 폭과 직경은 150 mm와 250 mm로 설정하였고, 페를이 연삭 공정으로 진입할 때의 정밀도를 고려해서 RW의 폭과 직경은 180 mm와 205 mm로 설정하였다. 또한 페를의 소재가 지르코니아라는 점 때문에 GW로는 다이아몬드 스톨을 사용하였다.

2.2 GW/RW 주축계

초정밀 무심 연삭기의 주축계는 GW 주축계와 RW 주축계로 나누어진다. 특히 페를의 진원도와 표면 조도가 주축계의 회전 정밀도에 의해서 많이 좌우된다는 점을 고려해서 초정밀 무심 연삭기의 주축계에는 유정압 베어링을 적용하였고, 연삭력에 의한 스톨의 처짐을 최소화하기 위해서 GW와 RW를 좌·우측 유정압 저널 베어링 사이에 위치시키는 방법으로 주축계의 고강성화를 도모하였다.

GW 주축계와 RW 주축계에 적용된 유정압 저널 베어링의 형상과 주요 제원은 Fig. 2와 Table 2, 그리고 유정압 슬러스트 베어링의 형상과 주요 제원은 Fig. 3과 Table 3에 각각 제시하였다.⁵

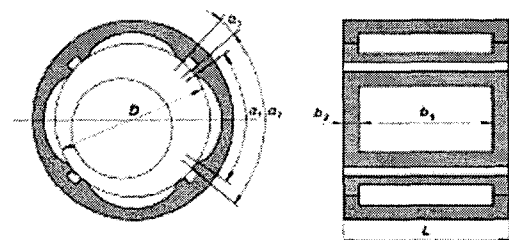


Fig. 2 Scheme of hydrostatic journal bearing

Table 2 Specification of hydrostatic journal bearing

Specification	GW spindle	RW spindle
Diameter/Length	60, 60 mm	50, 50 mm
Angles $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	63°, 86.18°, 3.82°	62.5°, 80.8°, 9.2°
Axial length	48, 6 mm	40, 5 mm
Bearing clearance	20 μm	20 μm
Stiffness	241 N/μm	163 N/μm
Flow rate of oil	0.72 l/min	0.82 l/min
Supply pressure	2 MPa	
Density	822 kg/m ³	
Specific heat	1,800 J/kg·°C	
Dynamic viscosity	5 cSt (40°C)	

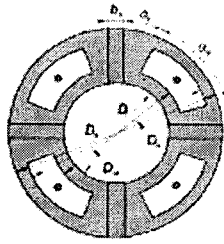


Fig. 3 Scheme of hydrostatic thrust bearing

Table 3 Specification of hydrostatic thrust bearing

Specification	GW spindle	RW spindle
D_1, D_{10}, D_{01}, D_0	64, 67, 77, 80 mm	54, 58, 68, 72 mm
Angle α_1, α_p, b_s	11.91°, 63°, 4 mm	11.68°, 63°, 4 mm
Bearing clearance	20 μm	20 μm
Stiffness	150 N/ μm	143 N/ μm
Flow rate of oil	2.80 l/min	1.53 l/min
Supply pressure	2 MPa	
Density	822 kg/m ³	
Specific heat	1,800 J/kg °C	
Dynamic viscosity	5 cSt (40 °C)	

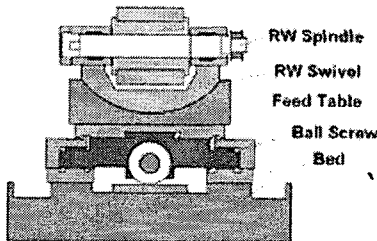


Fig. 4 Structure of hydrostatic guide way

Table 4 Specification of hydrostatic guide way

Specification	Horizontal	Vertical
Number of pad	6	12
Pad dimension	120×32 mm	120×32 mm
Bearing clearance	25 μm	25 μm
Static stiffness	480 N/ μm	960 N/ μm
Flow rate of oil	0.65 l/min	1.30 l/min
Supply pressure	1 MPa	
Density	822 kg/m ³	
Specific heat	1,800 J/kg °C	
Dynamic viscosity	5 cSt (40 °C)	

2.3 RW 테이블 이송계

페룰의 외경 치수 정밀도와 원통도는 초정밀 무심 연삭기의 가공 원리 상 RW 테이블 이송계의 정밀도와 강성에 의한 영향을 많이 받기 때문에 RW 테이블 이송계는 유정압 안내 방식과 서보 모터-볼 스크류 구동 방식을 적용해서 설계하였다. 특히 가공 부하가 이송계의 축 방향으로 대부분 작용하기 때문에 볼 스크류는 오버사이즈 볼 예압 방식의

NSK PFT 4006-7.5, 그리고 서보 모터 측에 설치된 4열의 서포트 베어링은 앵글러 콘택트 볼 베어링 NSK 30TAC62 로 선정하여 이송계의 축 방향 강성을 높게 부여하였다.

유정압 안내면의 수직 방향 강성은 이송 테이블 위에 설치되는 RW 주축대와 RW 드레서의 자중을 고려해서 설정해야 하고, 수평 방향 강성은 페룰의 치수 정밀도에 큰 영향을 미치는 이송 테이블의 요오차가 작게 되도록 설정할 필요가 있다. 따라서 유정압 안내면의 구조로는 Fig. 4와 같이 레일이 유정압 베어링을 감싸는 양면 지지형 패드 방식의 역구속형을 채용함으로써 유정압 안내면의 강성과 조립성 향상을 도모하였다. 또한 이송 정밀도를 높이기 위해서는 이송계의 좌우 대칭 구조화 설계 외에도 유정압 베어링의 리세스 압력에 의한 안내면 구조의 탄성 변형을 최소화할 필요가 있다. Table 4는 이러한 개념들을 반영한 유정압 안내면의 주요 재원을 보여주고 있다.⁵

3. 초정밀 무심 연삭기의 열 특성 해석

3.1 열 해석 모델과 냉각수 유로

본 연구에서는 페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기의 열 특성을 평가하기 위해서 Fig. 5와 같은 열 해석 모델을 구축하였다. 초정밀 무심 연삭기의 열 해석 모델은 79,319 개의 절점과 94,867 개의 솔리드 요소(Solid70)로 구성되었다.

초정밀 무심 연삭기를 구성하는 주요 구조 재료로는 베드, 주축, 볼 스크류 등의 재료인 강재, 테이블, 레일, 베어링 브래킷 등의 재료인 주철, 베드 내에 충전되는 콘크리트 등이 있다. 그리고 초정밀 무심 연삭기의 총 질량은 열 해석 모델로부터 약 2,905kg 정도인 것으로 예측되었다.

또한 페룰 연삭 시에는 Fig. 5 에서와 같이 절삭

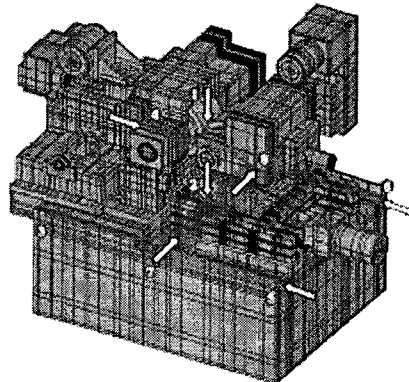


Fig. 5 Virtual prototype and coolant path of grinding machine

유가 분사 노즐을 통해서 연삭 부위로 공급됨과 동시에, 베드 상면의 네 모서리에서 냉각수가 공급되어 베드를 냉각시키는 역할을 수행하게 된다. 즉 ①은 절삭유 공급 위치, ②는 절삭유가 연삭 부위를 통과한 직후의 위치를 나타낸 것이고, ③, ④, ⑤ 및 ⑥은 냉각수의 공급 위치, ⑦은 냉각수가 합류하는 위치, 그리고 ⑧은 냉각수 및 절삭유가 배출되는 위치를 나타낸 것이다. 특히 페룰 연삭 중에는 절삭유와 냉각수의 유량이 각각 37.5 l/min 씩 공급되도록 설정되어 있다.

3.2 열원 및 열 전달률

초정밀 무심 연삭기의 열 특성 해석을 위해서 유정압 베어링, 벨트 풀리, 풀리 서포트 베어링, 모터 등과 같은 열원들의 열 전달률과 함께, 대기 접촉면과 절삭유/냉각수 유로에서의 대류 열 전달에 의한 냉각 효과를 고려하였다.

∴ 일반적으로 유정압 베어링에서의 발열 원인은 크게 2 가지로 나누어 생각할 수 있다. 하나는 베어링 유막의 전단 발열이고, 다른 하나는 윤활유의 압력 강하에 의한 발열이다. 그러나 실제 기계에서는 온도가 상승된 윤활유와 함께 외부로 방출되는 열량이 존재하기 때문에 기계 구조의 온도 상승에 기여하는 열 전달량은 베어링 내의 총 발열량에서 윤활유에 의한 방출 열량을 제외한 열량이 된다.

그러나, 유정압 스러스트 베어링의 경우에는 유량이 상대적으로 많기 때문에 윤활유에 의한 방출 열량이 커서 실제 열 전달량은 미미한 것으로 나타난다. GW 주축계의 V 벨트와 풀리 사이의 마찰에 의한 발열량과 풀리 서포트 베어링에서의 발열량은 그대로 기계 구조의 온도 상승에 기여하기 때문에 발열량 자체가 열 전달량이라고 간주하였다. 또한 페룰 연삭 공정에서의 RW 이송계는 정지 상태를 유지하기 때문에 볼 스크류의 너트와 지지 베어링에서의 발열량은 없고, 유정압 안내면의 경우에도 단지 압력 강하에 의한 발열량이 있을 뿐이며, 그 발열량의 상당 부분이 윤활유와 함께 외부로 방출

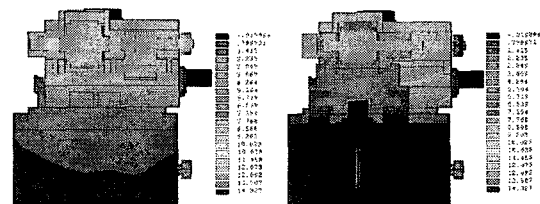
되는 것으로 알려졌다.

본 연구에서는 대기 온도가 일정하고, 유정압 베어링과 유정압 안내면으로의 급유 온도는 대기 온도와 같다고 가정하였다. 그리고 초정밀 무심 연삭기의 운전 조건은 GW 주축의 회전수가 2,300rpm, RW 주축의 회전수가 35rpm 인 것으로 상정하였으며, 이러한 운전 조건에 대한 주요 열원들의 열 전달률로는 Table 5 에 제시한 값들을 적용하였다.

3.3 온도 상승

Fig. 6 은 초정밀 무심 연삭기의 GW 주축계와 RW 주축계의 단면에 대한 온도 분포를 보여주고 있다. 초정밀 무심 연삭기의 최대 온도 상승은 14.3℃로 GW 주축계의 벨트 풀리에서 나타나고, 열원들이 집중적으로 위치한 GW 주축계와 RW 주축계에서 온도 상승이 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 GW 주축계가 RW 주축계에 비해서 온도 상승이 더 높은 것으로 나타났는데, 이것은 Table 5 에서 볼 수 있듯이 GW 주축계의 열원들이 RW 주축계의 열원들보다 상대적으로 열 전달률이 더 크기 때문이다. 이러한 해석 결과를 토대로 GW 주축계와 RW 주축계의 주요 위치에서의 온도 상승을 정리한 것은 Table 6 에 제시하였다.

특히 Fig. 6(a)에 제시한 GW 주축계의 온도 분포로부터 벨트 풀리에서의 발열은 풀리 서포트 베어링의 온도 상승에는 다소 기여하지만 GW 주축계 전체로는 확산되지 않고, 벨트 풀리와 근접한 부위를 제외한 GW 주축계의 온도 상승은 전적으로 유정압 저널 베어링의 발열에 기인하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 6(b)에 제시한 RW 주축계의 온도 상승도 유정압 저널 베어링의 발열에 의한 영향이 지배적이라는 사실을 보여주고 있다.



(a) GW section (b) RW section
Fig. 6 Temperature distribution of grinding machine

Table 6 Temperature rise of grinding machine

Position	GW spindle	RW spindle
Pocket of journal bearing (left)	6.1℃	2.4℃
Center of wheel spindle	5.6℃	3.1℃
Pocket of journal bearing (right)	5.5℃	2.2℃
Outer race of ball bearing (left)	4.1℃	-
Outer race of ball bearing (right)	4.7℃	-

Table 5 Heat transfer rate of grinding machine

Heat source		Heat transfer rate
GW spindle	Hydrostatic journal bearing	37.0 W
	Hydrostatic thrust bearing	1.0 W
	Pulley-support bearing	1.2 W
	Belt pulley	27.0 W
	Spindle motor	19.9 W
RW spindle	Hydrostatic journal bearing	12.0 W
	Hydrostatic thrust bearing	0.0 W
	Spindle motor	0.9 W
RW guide	Horizontal hydrostatic guide	0.1 W
	Vertical hydrostatic bearing	0.2 W

본 연구에서는 초정밀 무심 연삭기의 열 특성 해석 결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위해서 온도 측정 실험을 수행하였다. 온도 측정 실험은 약 4 시간 동안의 워밍업을 실시한 후 페를을 연삭하면서 수행하였는데, 실험 대상인 초정밀 무심 연삭기와 실험 장치의 모습은 Fig. 7 에서 볼 수 있다. 특히 연삭 부위의 온도 분포를 측정하기 위해서 열 화상 카메라(IRI1001E, IRISYS)를 사용하였으며, 냉각수 및 절삭유 온도는 T 타입의 열전대를 이용하여 Fig. 5 에 표기한 8 군데의 위치에서 측정하였다. 냉각수와 절삭유 온도 상승은 측정 위치에 따라서 다소 차이가 있었지만, 0.0~0.2℃ 정도에 불과했기 때문에 페를 연삭 과정에서의 발열량이 매우 작고, 유로 부분에서의 연삭기 온도도 낮은 것으로 파악되었다. 결과적으로 온도 측정 실험 중에는 대기 온도, 냉각수 및 절삭유의 공급 온도가 모두 약

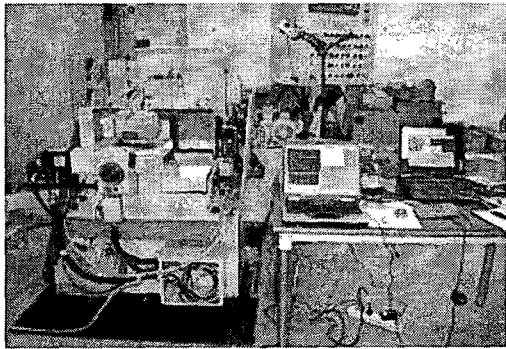


Fig. 7 Grinding machine and experimental apparatus

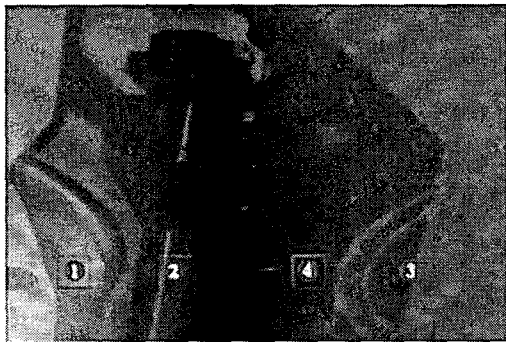


Fig. 8 Temperature measuring positions and temperature distribution of grinding zone

Table 7 Comparison of temperature rises

Position	Predicted	Measured
① Inner point of GW	5.6℃	5.5℃
② Outer point of GW	1.5℃	1.6℃
③ Inner point of RW	3.2℃	3.5℃
④ Outer point of RW	0.8℃	0.9℃

16℃로 거의 일정하게 유지되었다.

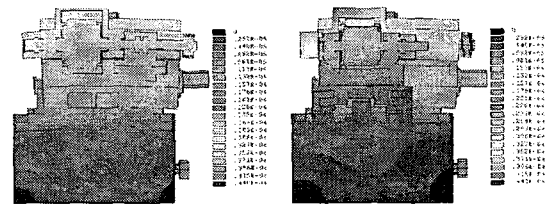
Fig. 8 은 연삭 영역의 온도 분포를 측정한 열 화상 사진이고, Table 7 은 Fig. 8 에 표기한 GW 와 RW 측면에서의 온도 상승에 대한 측정 결과와 해석 결과를 서로 비교한 것이다. 이러한 측정 결과와 해석 결과 사이의 오차가 작다는 사실로부터 해석 결과들의 신뢰성이 매우 높음을 알 수 있다. 또한 GW 의 온도 상승이 RW 의 온도 상승보다 상대적으로 높은 것은 GW 주축계의 온도 상승이 RW 주축계의 온도 상승보다 전반적으로 높다는 데 기인한다.

3.3 열 변형

초정밀 무심 연삭기의 온도 상승에 대한 해석 결과를 토대로 열 변형 해석을 수행하였으며, 특히 가공 정밀도와 밀접한 관련을 갖는 GW 와 RW 의 상대 열 변위를 규명하는 데 해석의 초점을 두었다. 초정밀 무심 연삭기의 GW 주축계와 RW 주축계의 단면에 대한 열 변형 분포는 Fig. 9 에 제시하였다. 또한 GW 주축과 RW 주축의 수평 방향 열 변위와 수직 방향 열 변위를 그래프 형태로 표현한 것은 Fig. 10 과 11 에 나타내었다.

열원들이 집중된 GW 주축계에서 상대적으로 열 변형이 크게 발생하고 있음을 Fig. 9 에서 알 수 있다. 그리고 초정밀 무심 연삭기에서의 최대 열 변위는 44.0 μm이며, 그 위치는 GW 주축계의 하우징 상단으로 나타났다.

주축의 수평 방향과 수직 방향의 열 변위를 서로 비교한 Fig. 10 과 11 로부터 GW 주축과 RW 주축의 수평 방향 열 변위는 4.4~8.9 μm와 -0.4~3.7 μm 이고, GW 주축과 RW 주축의 수직 방향 열 변위는 11.3~21.6 μm와 5.2~8.3 μm인 것을 알 수 있다. 그러나 실제로 페를의 가공 정밀도에 영향을 주는 것은 주축 전체의 열 변위 편차가 아니라 GW 와 RW 가 장착되는 부분의 열 변위 편차이다. 이러한 관점에서 구한 GW 와 RW 장착부의 수평 방향 열 변위는 7.9~8.7 μm와 -0.4~0.2 μm로 GW 와 RW 사이의 수평 방향 상대 열 변위는 8.3~8.9 μm이다. 또한 GW 와 RW 장착부의 수직 방향 열 변위는 21.1~21.5 μm와



(a) GW section (b) RW section
Fig. 9 Thermal deformation of grinding machine

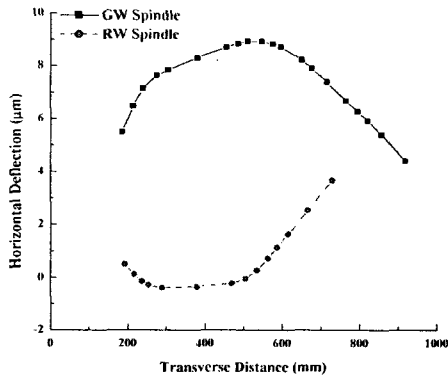


Fig. 10 Horizontal thermal deflection of spindles

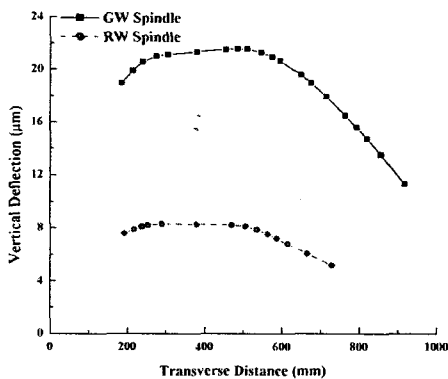


Fig. 11 Vertical thermal deflection of spindles

8.2~8.3 μm 로 GW와 RW 사이의 수직 방향 상대 열 변위는 12.9~13.2 μm 이다. 따라서 GW와 RW 사이의 수평 방향과 수직 방향의 상대 열 변위 편차는 각각 0.6 μm 과 0.3 μm 에 불과하기 때문에 열 변형에 의해서 유발되는 가공 정밀도의 저하 문제는 그다지 크지 않을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 유정압 베어링 기반의 주축계와 유정압 안내면 기반의 이송계를 채용한 페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기의 열 해석 모델을 구축하고, 그를 토대로 페룰의 연삭 조건(GW 주축의 회전수 2,300rpm, RW 주축의 회전수 35rpm)에 대해서 다양한 열적 특성을 해석 및 평가하였다. 특히 해석 결과의 신뢰성은 열 화상 카메라와 열전대를 이용해서 측정된 온도 특성과의 비교 분석을 통해서 입증하였다. 그리고 본 연구를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 초정밀 무심 연삭기의 최대 온도 상승은 약 14.3°C로 GW 주축계의 벨트 풀리에서 나타났다.

그러나 벨트 풀리에서의 발열은 풀리 서포트 베어링의 온도 상승에는 다소 기여하지만 GW 주축계 전체로는 확산되지 않는다.

2) 벨트 풀리와 근접한 부위를 제외한 GW 주축계의 온도 상승은 전적으로 유정압 저널 베어링의 발열에 기인하고 있다. 그리고 RW 주축계의 온도 상승도 유정압 저널 베어링의 발열에 의한 영향이 지배적이다.

3) 초정밀 무심 연삭기에서의 최대 열 변위는 44.0 μm 이며, GW 주축계의 하우징 상단에서 발생한다. 전체적으로 열원들이 집중된 GW 주축계에서의 열 변형이 상대적으로 크게 나타났다.

4) GW와 RW 사이의 수평 방향과 수직 방향의 상대 열 변위 편차가 각각 0.6 μm 과 0.3 μm 에 불과하기 때문에 초정밀 무심 연삭기의 열 변형에 의한 가공 정밀도의 저하 현상은 매우 작다고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 "고기능성 부품가공용 지능형 연삭시스템 개발" 과제에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Cho, S. J., Kim, H. G., Ebihara and Tuskisima, "The Study on the Development of Ultra Precision Centerless Grinder," Journal of KSPE, Vol. 20, No. 6, pp. 11-14, 2003.
2. Park, C. H., Hwang, J. H. and Cho, S. J., "A Study on the Feeding System of Centerless Grinder for Machining the Ferrule," Proc. of KSPE, pp. 65-69, 2002.
3. Kim, S. I., Park, C. H. and Cho, S. J., "Structural Characteristic Analysis on the Hydrostatic Guide Way and Feeding System of a High-Precision Centerless Grinder for Machining Ferrules," Trans. of KSME (A) Vol. 28, No. 7, pp. 896-903. 2004.
4. Kim, S. I. and Cho, J. W., "Structural Characteristic Analysis of a High-Precision Centerless Grinding Machine with Concrete-Filled Bed," Journal of KSPE, Vol. 22, No. 2, pp. 172-179. 2005.
5. Park, C. H., "Design and Performance Evaluation on the Motion Elements of Centerless Grinder," 3rd Mid-Evaluation Workshop of Intelligent Grinding System, 2004.