

< 논문 >

## 페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기의 구조적 및 열적 민감도 해석

김 석 일<sup>†</sup> · 이 원 재<sup>\*</sup>

(2006년 7월 19일 접수, 2006년 10월 12일 심사완료)

### Structural and Thermal Sensitivity Analysis of a High-Precision Centerless Grinding Machine for Machining Ferrules

Seok-II Kim and Won-Jae Lee

**Key Words :** High-Precision Centerless Grinding Machine(초정밀 무심 연삭기), Grinding Wheel(GW, 연삭 스톨), Regulating Wheel(RW, 조정 스톨), Sensitivity Analysis(민감도 해석), Loop Stiffness(루프 강성), Ferrule(페룰)

#### Abstract

High-precision centerless grinding machines are emerging as a means of finishing the outer diameter grinding process required for ferrules, which are widely used as fiber optic connectors. In this study, a sensitivity analysis for structural and thermal characteristics was carried out using a virtual prototype of a centerless grinding machine to realize systematic design technology and performance improvements required to manufacture ferrules. The prototype consisted of a concrete-filled bed, hydrostatic grinding wheel (GW) and regulating wheel (RW) spindle systems, a hydrostatic RW table feed mechanism, a RW swivel mechanism, and on-machine GW and RW dressers. The results of the structural sensitivity analysis illustrated that the vertical stiffness of hydrostatic guideway for the RW table feed system greatly influenced the horizontal loop stiffness, and the results of the thermal sensitivity analysis illustrated that the heat generation rates at hydrostatic bearings and belt pulley greatly influenced the temperature rise of hydrostatic bearings and the deviation of thermal displacement between GW and RW.

#### 1. 서 론

광통신 정보의 전송 효율과 품질을 좌우하는 광 커넥터의 핵심 부품인 페룰은 내경을 기준으로 한 외경 연삭 공정이 필수적으로 요구된다.<sup>(1)</sup> 특히 페룰의 요구 정밀도는 1  $\mu\text{m}$  이하이며, 내·외경 치수 정밀도와 원통도는 엄격하게 관리되고 있다. 최근 이러한 페룰의 외경 연삭을 능률적으로 수행하기 위한 수단으로써 무심 연삭기가 많은 주목을 받고 있다.<sup>(2)</sup> 특히 무심 연삭기에서의 제품 정밀도는 작업자의 숙련도보다는 거의 기계의 가공 정밀도에 의해서 좌우되기 때문에 페룰 외경의 초정밀 가공을 구현할 수 있는 초정밀 무심 연삭기의 개

발 필요성이 적극 제기되고 있는 상황이다. 그리고 초정밀 무심 연삭기의 성공적인 개발을 위해서는 무엇보다도 구조적 안정성과 열적 안정성에 대한 확보가 매우 중요하다.

페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기와 관련된 연구로서 Cho 등<sup>(3)</sup>은 그 구비 성능과 기능들을 검토하였고, Park 등<sup>(4)</sup>은 초정밀 무심 연삭기에 대한 유정압 이송계의 적용 가능성을 검토하기 위해서 유정압 이송계의 강성, 운동 정밀도, 미소 분해능, 위치 결정 오차 등을 실험하였다. Kim 등<sup>(5)</sup>은 초정밀 무심 연삭기의 유정압 이송계에 대한 구조 해석과 실험을 통해서 구조 설계의 타당성을 평가하였으며, 이송계의 축 방향 및 수직 방향 강성에 미치는 구조 요소들의 영향을 분석함으로써 실험적으로 파악하기 어려운 강성 저하 원인을 규명하였다. 그리고 Kim 등<sup>(6)</sup>은 콘크리트 충전 베드의 적용이 초정밀 무심 연삭기의 고강성화 및 고정밀화에 크게 기여한다는 사실을 입증하였다. 또한

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국항공대학교

항공우주 및 기계공학부

E-mail : sikim@hau.ac.kr

TEL : (02)300-0176 FAX : (02)3158-4231

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원

Kim 등<sup>(7)</sup>은 베어링, 벨트 풀리, 모터 등과 같은 열원들의 열 전달률 해석과 함께 대기 접촉면, 냉각수 유로 등에서의 대류 열 전달에 의한 냉각 효과를 고려해서 초정밀 무심 연삭기의 온도 분포, 온도 상승, 열 변형 등을 해석하였다.

본 연구는 초정밀 무심 연삭기의 구조 특성과 열 특성에 대한 민감도 해석을 통해서 구조적 및 열적 설계의 변화가 초정밀 무심 연삭기의 성능 변화에 미치는 영향을 평가하고, 그것을 토대로 개선 설계 방향에 대한 지침을 제시하는 데 그 목적을 두었다. 이를 위해서 GW·RW 주축계, RW 테이블 이송계, RW 선회대, GW·RW의 기상 드레서, 콘크리트 충전 베드 등으로 구성된 초정밀 무심 연삭기의 구조 해석 모델과 열 해석 모델을 구축한 후, 유정압 베어링, 유정압 안내면 및 볼 스크류 기구의 강성 변화가 초정밀 무심 연삭기의 루프 강성 변화에 미치는 구조적 민감도 해석, 그리고 유정압 베어링, 풀리 서포트 베어링 및 풀리의 열 전달률 변화가 초정밀 무심 연삭기의 온도 상승과 열 변형에 미치는 열적 민감도 해석을 각각 수행하였다. 그리고 구조적 및 열적 민감도는 강성 및 열 전달률의 % 변화에 대한 구조적 및 열적 특성값의 % 변화의 비(%/%)로 나타내었다. 특히 구조적 민감도 해석 결과로부터 RW 테이블 이송계의 유정압 안내면의 수직 방향 강성이 가공 정밀도와 밀접하게 관련된 수평 방향 루프 강성에 큰 영향을 준다는 점, 그리고 열적 민감도 해석 결과로부터 유정압 저널 베어링과 풀리의 열 전달률이 가공 정밀도와 밀접하게 관련된 GW와 RW 사이의 수평 방향의 상대 열 변위 편차에 큰 영향을 준다는 점을 규명하였다.

## 2. 초정밀 무심 연삭기의 해석 모델

### 2.1 기계 구조

Fig. 1은 본 연구의 해석 대상인 페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기의 기본 구조를 보여주고 있다. 초정밀 무심 연삭기의 GW 주축대는 베드 위에 설치되고, RW의 설치 각도를 조정해서 공작물의 이동 속도를 조절하는 선회대가 부착된 RW 주축대는 이송 테이블 위에 설치된다. 그리고 기계 구조의 고강성화를 위해서 강제 베드의 내부를 콘크리트로 충전하였다.

초정밀 무심 연삭기에서는 주축계의 회전 정밀도가 가공물의 진원도와 표면 조도에 큰 영향을 주기 때문에 주축계의 베어링으로는 Fig. 2의 형상과 Table 1의 제원을 갖는 유정압 저널 베어링과

Fig. 3의 형상과 Table 2의 제원을 갖는 유정압 스톱 베어링을 적용하였다. 그리고 GW와 RW를 모두 좌·우측 유정압 저널 베어링 사이에 위치시키는 방법으로 주축계의 고강성화를 도모함으로써 연삭력에 의한 슛들의 처짐을 최소화하였다.

초정밀 무심 연삭기에서는 페룰의 외경 치수 정밀도와 원통도가 RW 테이블 이송계의 정밀도와 강성의 영향을 많이 받기 때문에 유정압 안내면과 서보 모터-볼 스크류 구동 기구를 RW 테이블 이송계에 적용하였다. 또한 가공 부하는 RW 테이블의 이송 방향으로 대부분 작용하기 때문에 높은 가공 정밀도를 얻기 위해서는 RW 테이블 이송계의 축방향 강성이 높아야 한다. 이 점들을 고려해서 RW 테이블 이송계의 볼 스크류는 오버-사이즈

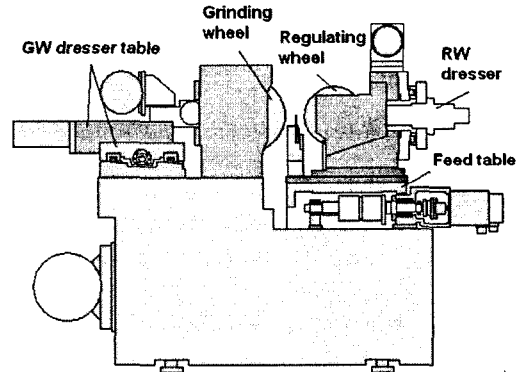


Fig. 1 Schematic diagram of a grinding machine

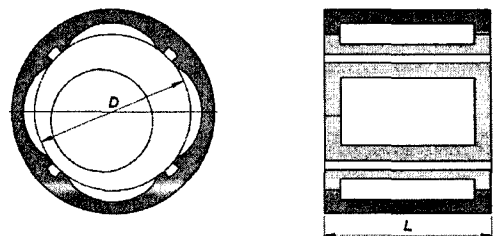


Fig. 2 Schematic diagram of the hydrostatic journal bearings

Table 1 Specifications of the hydrostatic journal bearings

| Specifications         | GW spindle                               | RW spindle             |
|------------------------|--|------------------------|
| Diameter/Length $D, L$ | 60, 60 mm                                | 50, 50 mm              |
| Bearing clearance      | 20 $\mu\text{m}$                         | 20 $\mu\text{m}$       |
| Flow rate of oil       | 0.72 $\ell/\text{min}$                   | 0.82 $\ell/\text{min}$ |
| Supply pressure        | 2 MPa                                    |                        |
| Density                | 822 $\text{kg}/\text{m}^3$               |                        |
| Specific heat          | 1,800 $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ |                        |
| Dynamic viscosity      | 5 cSt (40 $^\circ\text{C}$ )             |                        |

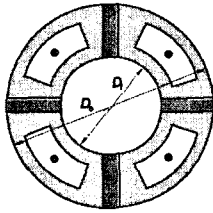


Fig. 3 Schematic diagram of the hydrostatic thrust bearings

Table 2 Specifications of the hydrostatic thrust bearings

| Specifications    | GW spindle                               | RW spindle             |
|-------------------|--|------------------------|
| $D_i, D_o$        | 64, 80 mm                                | 54, 72 mm              |
| Bearing clearance | 20 $\mu\text{m}$                         | 20 $\mu\text{m}$       |
| Flow rate of oil  | 2.80 $\ell/\text{min}$                   | 1.53 $\ell/\text{min}$ |
| Supply pressure   | 2 MPa                                    |                        |
| Density           | 822 $\text{kg}/\text{m}^3$               |                        |
| Specific heat     | 1,800 $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ |                        |
| Dynamic viscosity | 5 cSt (40 $^\circ\text{C}$ )             |                        |

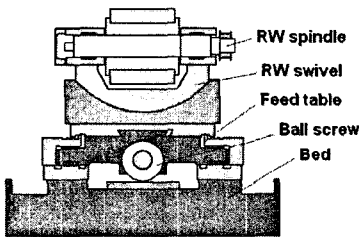


Fig. 4 Hydrostatic guideway structure

볼 예압 방식의 NSK PFT 4006-7.5, 그리고 서보 모터 측에 설치된 4열의 지지 베어링은 앵글러 콘택트 볼 베어링 NSK 30TAC62로 선정하였다.

유정압 안내면의 수평 방향 강성은 가공물의 치수 정밀도에 큰 영향을 미치는 이송 테이블의 요(yaw) 오차가 허용 한계 이하가 되도록 설정해야 하고, 수직 방향 강성은 이송 테이블 위에 설치되는 RW 주축대와 RW 드레서의 하중을 고려해서 설정해야 한다. 따라서 유정압 안내면의 구조로는 레일이 유정압 베어링을 감싸는 양면 지지형 패드(double pad) 방식의 역구속형을 채용하여 유정압 안내면의 강성과 조립성 향상을 도모하였다. 또한 이송계의 좌우 대칭 구조화 설계를 통해서 이송 정밀도를 높였다. 유정압 안내면의 구조 형태와 제원은 Fig. 4와 Table 3에 제시하였다.

GW의 폭과 직경은 Table 4와 같은 제원의 페룰을 동시에 10개씩 가공할 수 있도록 150 mm와 250 mm로 설정하였고, RW의 폭과 직경은 페룰이 연삭 공정으로 진입할 때의 정밀도를 고려해서

Table 3 Specifications of the hydrostatic guideway

| Specifications    | Horizontal                               | Vertical               |
|-------------------|--|------------------------|
| Number of pads    | 6  | 12                     |
| Pad dimensions    | 120×32 mm                                | 120×32 mm              |
| Bearing clearance | 25 $\mu\text{m}$                         | 25 $\mu\text{m}$       |
| Flow rate of oil  | 0.65 $\ell/\text{min}$                   | 1.30 $\ell/\text{min}$ |
| Supply pressure   | 1 MPa                                    |                        |
| Density           | 822 $\text{kg}/\text{m}^3$               |                        |
| Specific heat     | 1,800 $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ |                        |
| Dynamic viscosity | 5 cSt (40 $^\circ\text{C}$ )             |                        |

Table 4 Ferrule specifications

| Dimensions | 2.5×10.5 mm            | Accuracy      | 60.5 $\mu\text{m}$ |
|------------|------------------------|---------------|--------------------|
| Material   | ZrO <sub>2</sub>       | Roundness     | 0.5 $\mu\text{m}$  |
| Roughness  | 0.05 $\mu\text{m R}_a$ | Concentricity | 1.0 $\mu\text{m}$  |

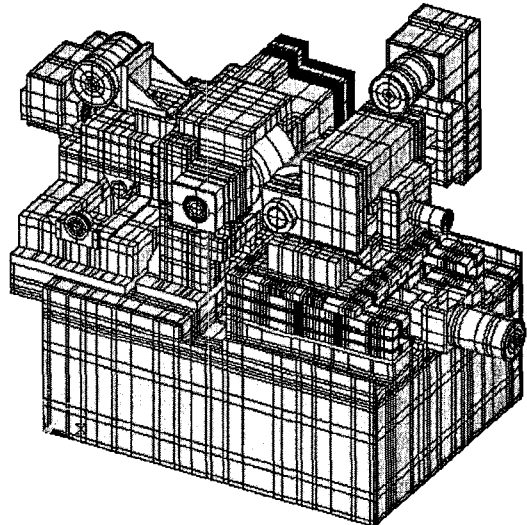


Fig. 5 Virtual prototype of the grinding machine

180 mm와 205 mm로 설정하였다. 또한 페룰의 소재가 지르코니아(zirconia)라는 점을 고려해서 다이아몬드 스톤을 GW로 선정하였고, GW 주축대와 RW 주축대 후면에 GW와 RW의 기상 드레서를 설치하여 구조의 단순화와 연삭 작업의 고능률화를 도모하였다.

2.2 유한 요소 모델

Fig. 5는 초정밀 무심 연삭기의 구조적 및 열적 민감도를 분석하기 위해서 구축한 해석 모델의 형태를 보여주고 있으며, Fig. 6은 초정밀 무심 연삭기의 구성에 대한 이해를 돕기 위해서 주요 모듈별로 해석 모델을 분해한 것이다. 초정밀 무심 연삭기의 구조 해석 모델은 81,584개의 절점, 95,090개의 솔리드 요소와 170개의 매트릭스 요소로 구성되었으며, 열 해석 모델은 79,319개의 절점과 94,867개의 솔리드 요소로 구성되었다.

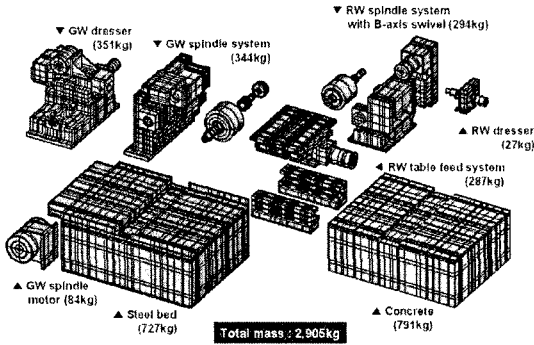


Fig. 6 Structural modules of the virtual prototype

Table 5 Material properties used for the virtual prototype

| Material | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Young's modulus (GPa) | Poisson's ratio | Thermal conductivity (W/m°C) | Thermal expansion (μm/°C) | Specific heat (J/kg°C) |
|----------|------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|
| SS400    | 7,870                        | 205.0                 | 0.30            | 42.7                         | 10.4                      | 473                    |
| SCM435   | 7,850                        | 205.0                 | 0.28            | 42.7                         | 11.2                      | 477                    |
| SCM415   | 7,850                        | 205.0                 | 0.28            | 44.5                         | 11.2                      | 475                    |
| GC300    | 7,300                        | 90.0                  | 0.25            | 55.8                         | 17.1                      | 565                    |
| Concrete | 2,320                        | 27.0                  | 0.18            | 1.0                          | 10.5                      | 657                    |
| GW       | 3,800                        | 50.0                  | 0.30            | 1.0                          | 7.6                       | 664                    |
| RW       | 1,150                        | 2.0                   | 0.40            | 0.4                          | 80.0                      | 2,092                  |
| Al       | 2,700                        | 70.0                  | 0.33            | 205.0                        | 24.0                      | 900                    |
| SUJ2     | 7,860                        | 205.8                 | 0.30            | 41.9                         | 12.5                      | 473                    |
| Fe-Si    | 7,700                        | 21.0                  | 0.30            | 42.7                         | 15.0                      | 477                    |
| Cu       | 8,930                        | 123.0                 | 0.34            | 397.5                        | 16.5                      | 385                    |

Table 6 Stiffnesses used for the virtual prototype

| Joint element        |                                   | Stiffness (N/μm) |
|----------------------|-----------------------------------|------------------|
| GW spindle           | Hydrostatic journal bearing       | 244              |
|                      | Hydrostatic thrust bearing        | 152              |
| RW spindle           | Hydrostatic journal bearing       | 164              |
|                      | Hydrostatic thrust bearing        | 144              |
| RW table feed system | Hydrostatic guideway (Horizontal) | 480              |
|                      | Hydrostatic guideway (Vertical)   | 960              |
|                      | Ball screw mechanism              | 357              |

Table 7 Heat transfer rates used for the virtual prototype

| Heat source |                             | Heat transfer rate (W) |
|-------------|-----------------------------|------------------------|
| GW spindle  | Hydrostatic journal bearing | 37.4                   |
|             | Hydrostatic thrust bearing  | 1.0                    |
|             | Pulley-support bearing      | 1.2                    |
|             | Belt pulley                 | 27.0                   |
|             | Spindle motor               | 19.9                   |
| RW spindle  | Hydrostatic journal bearing | 12.0                   |
|             | Hydrostatic thrust bearing  | 0.0                    |
|             | Spindle motor               | 0.9                    |

초정밀 무심 연삭기를 구성하는 주요 구조 재료로는 베드, 주축, 볼 스크류 등의 재료인 강재 (SS440, SCM435, SCM415), 테이블, 레일, 베어링 브라켓 등의 재료인 주철 (GC300), 베드 내에 충전되는 콘크리트 등이 있으며, 민감도 해석에서

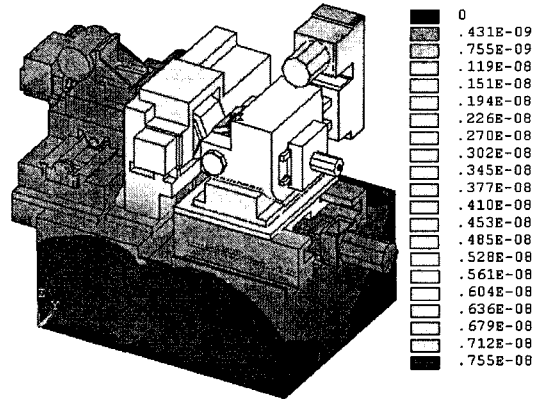


Fig. 7 Structural deformation of the virtual prototype due to a unit horizontal grinding force

사용한 구조 재료의 물성은 Table 5에 제시하였다. 그리고 Fig. 6에 나타난 주요 모듈들의 질량은 강재 베드 727 kg, 콘크리트 791 kg, RW 테이블 이송기구 (테이블, 레일, 볼 스크류, 브라켓, 서보 모터 등) 287 kg, GW 주축대 (주축, 하우징 등) 344 kg, RW 주축대 (주축, 하우징, 모터 등) 294 kg, GW 드레서 351 kg, RW 드레서 27 kg, GW 주축 구동 모터 84 kg 등이며, 초정밀 무심 연삭기의 총 질량은 약 2,905 kg으로 예측되었다.

초정밀 무심 연삭기의 구조 해석 모델을 구축하기 위해서 사용한 유정압 베어링, 유정압 안내면, 볼스크류 기구 등과 같은 주요 결합부의 강성은 Table 6에 나타내었다. 그리고 열 해석 모델을 구축하기 위해서 사용한 유정압 베어링, 벨트 풀리, 풀리 서포트 베어링, 모터 등과 같은 주요 열원의 열 전달률은 Table 7에 제시하였다. 특히 Table 7의 열 전달률들은 페를을 무심 연삭할 때의 운전 조건인 GW 주축계의 회전수 2,300 rpm과 RW 주축계의 회전수 35 rpm을 기준으로 한 것이며, 무심 연삭 중에는 RW 테이블이 정지 상태를 유지하기 때문에 유정압 안내면에서의 열 전달률은 매우 미미하므로 열 해석 과정에서는 그 영향을 무시하였다.

### 3. 구조적 민감도 해석

#### 3.1 수평 방향 루프 강성

초정밀 무심 연삭기의 수평 방향 루프 강성은 수평 방향 연삭력 1 N이 서로 반대 방향으로 GW와 RW에 작용할 때 얻어지는 GW와 RW 사이의 수평 방향 상대 변위로부터 예측할 수 있다. 수평 방향 연삭력 1N에 의해서 야기되는 초정밀 무심

**Table 8** Sensitivity of joint stiffnesses with respect to the horizontal loop stiffness of the virtual prototype

| Joint element                    | Sensitivity (%/%) |
|----------------------------------|-------------------|
| Hydrostatic journal bearing (GW) | 0.056             |
| Hydrostatic journal bearing (RW) | 0.073             |
| Hydrostatic guideway (Vertical)  | 0.248             |
| Ball screw mechanism             | 0.010             |

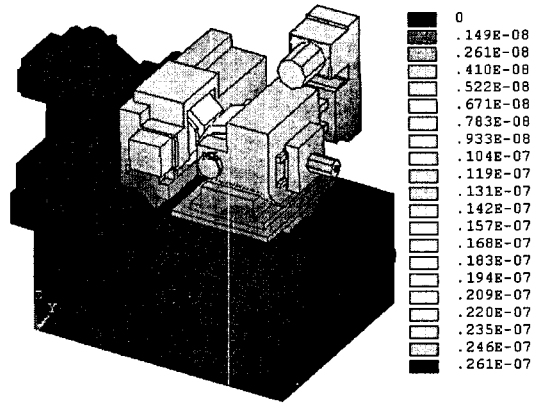
연삭기의 구조 변형은 Fig. 7에 제시하였으며, GW와 RW의 수평 방향 변위는 각각  $-0.00376 \mu\text{m}$ 와  $0.00677 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 따라서 초정밀 무심 연삭기의 수평 방향 루프 강성은  $95.0 \text{ N}/\mu\text{m}$ 인 것으로 평가된다.

Table 8은 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링, RW 테이블 이송계의 유정압 안내면 및 볼 스크류 기구 등과 같은 결합부의 강성이 초정밀 무심 연삭기의 수평 방향 루프 강성에 미치는 영향을 민감도 형태로 나타낸 것이다. 수평 방향 루프 강성은 RW 테이블 이송계의 유정압 안내면의 수직 방향 강성에 의해서 가장 큰 영향을 받는데, 수평 방향 루프 강성에 대한 유정압 안내면의 수직 방향 강성의 민감도는  $0.248 \text{ \%/\%}$ 이다. 이와 같이 유정압 안내면의 수직 방향 강성이 수평 방향 루프 강성에 큰 영향을 미치는 원인은 수평 방향 연삭력에 의해서 야기되는 GW 주축대와 RW 주축대의 굽힘 변형이 수평 방향 루프 강성과 밀접한 관련이 있고, 특히 RW 주축대의 굽힘 변형이 유정압 안내면의 피치 운동에 의해서 크게 증대되기 때문인 것으로 판단된다.

그리고 수평 방향 루프 강성에 대한 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링 강성의 민감도는 각각  $0.056 \text{ \%/\%}$ 와  $0.073 \text{ \%/\%}$ 이지만, RW 테이블 이송계의 볼 스크류 기구의 축 방향 강성의 민감도는  $0.010 \text{ \%/\%}$ 인 것으로 나타났다. 이와 같이 수평 방향 루프 강성에 대한 볼 스크류 기구의 축 방향 강성의 민감도가 작다는 사실은 RW의 수평 방향 변위가 볼 스크류 기구의 축 방향 변형보다 RW 주축대의 굽힘 변형에 의해서 더 많이 야기된다는 점, 그리고 볼 스크류 기구가 고강성화 설계되었다는 점을 의미한다.

**3.2 수직 방향 루프 강성**

수직 방향 연삭력  $1 \text{ N}$ 이 서로 반대 방향으로 GW와 RW에 작용할 때 얻어지는 GW와 RW 사이의 수직 방향 상대 변위로부터 초정밀 무심 연삭기의 수직 방향 루프 강성을 예측할 수 있다. Fig. 8은 수직 방향 연삭력  $1 \text{ N}$ 에 의해서 야기되는 초정밀 무심 연삭기의 구조 변형을 보여주고 있는데, GW와 RW의 수직 방향 변위는 각각  $0.00221 \mu\text{m}$ 와



**Fig. 8** Structural deformation of the virtual prototype due to a unit vertical grinding force

**Table 9** Sensitivity of joint stiffnesses with respect to the vertical loop stiffness of the virtual prototype

| Joint element                    | Sensitivity (%/%) |
|----------------------------------|-------------------|
| Hydrostatic journal bearing (GW) | 0.111             |
| Hydrostatic journal bearing (RW) | 0.103             |
| Hydrostatic guideway (Vertical)  | 0.044             |
| Ball screw mechanism             | 0.000             |

$-0.00296 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 따라서 초정밀 무심 연삭기의 수직 방향 루프 강성은  $193.4 \text{ N}/\mu\text{m}$ 인 것으로 평가된다.

Table 9는 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링, RW 테이블 이송계의 유정압 안내면 및 볼 스크류 기구 등과 같은 결합부의 강성이 초정밀 무심 연삭기의 수직 방향 루프 강성에 미치는 영향을 민감도 형태로 나타낸 것이다. 수직 방향 루프 강성은 수평 방향 루프 강성과 달리 유정압 안내면의 수직 방향 강성보다 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링 강성에 의해서 상대적으로 더 큰 영향을 받는데, 수직 방향 루프 강성에 대한 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링 강성의 민감도는 각각  $0.111 \text{ \%/\%}$ 와  $0.103 \text{ \%/\%}$ 로 나타났다.

또한 수직 방향 루프 강성에 대한 유정압 안내면의 수직 방향 강성의 민감도는  $0.044 \text{ \%/\%}$ 로 수평 방향 루프 강성에 대한 민감도  $0.248 \text{ \%/\%}$ 보다 작게 나타났다. 그 주요 원인은 구조적으로 유정압 안내면의 피치 운동을 야기하는 모멘트의 크기가 수평 방향 연삭력이 작용할 때보다 수직 방향 연삭력이 작용할 때가 작다는 점, 그리고 유정압 안내면의 피치 운동이 RW의 수평 방향 변위보다 RW의 수직 방향 변위에 미치는 영향이 작다는 점에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 열적 민감도 해석

4.1 온도 상승

초정밀 무심 연삭기의 GW 주축계와 RW 주축계에 대한 온도 분포는 Fig. 9에 단면도 형태로 나타내었다. 열원들이 집중적으로 위치한 GW 주축계와 RW 주축계에서의 온도 상승이 두드러진 것을 볼 수 있는데, GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 온도 상승은 각각 5.80 °C와 2.28 °C이고, 풀리 서포트 베어링의 온도 상승은 4.35 °C인 것으로 나타났다.

Table 10은 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링, 그리고 풀리 서포트 베어링의 온도 상승에 대한 GW 주축계의 유정압 저널 베어링의 열 전달률 (Case 1), RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 열 전달률 (Case 2), 풀리 서포트 베어링의 열 전달률 (Case 3) 및 풀리의 열 전달률 (Case 4)의 영향을 민감도 형태로 표현한 것이다. Case 1에서는 GW 주축계의 유정압 저널 베어링과 풀리 서포트 베어링의 온도 상승에 대한 GW 주축계의 유정압 저널 베어링의 열 전달률의 민감도가 각각 0.923 %/°C와 0.320 %/°C, Case 2에서는 RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 온도 상승에 대한 RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 열 전달률의 민감도가 0.986 %/°C, Case 3에서는 GW 주축계의 유정압 저널 베어링과 풀리 서포트 베어링의 온도 상승에 대한 풀리 서포트 베어링의 열 전달률의 민감도가 각각 0.015 %/°C와 0.130 %/°C, 그리고 Case 4에서는 GW 주축계의 유정압 저널 베어링과 풀리 서포트 베어링의 온도 상승에 대한 풀리의 열 전달률의 민감도가 각각 0.059 %/°C 와 0.547 %/°C로 나타났다. 이러한 민감도 해석 결과들로부터

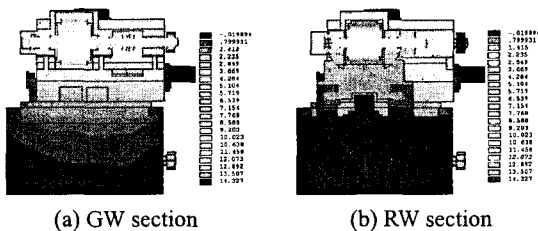


Fig. 9 Temperature distribution of the virtual prototype

Table 10 Sensitivity of heat transfer rates with respect to the temperature rise of the virtual prototype

| Measuring point                  | Case 1 (%/°C) | Case 2 (%/°C) | Case 3 (%/°C) | Case 4 (%/°C) |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Hydrostatic journal bearing (GW) | 0.923         | 0.000         | 0.015         | 0.059         |
| Hydrostatic journal bearing (RW) | 0.000         | 0.986         | 0.000         | 0.000         |
| Pulley-support bearing           | 0.320         | 0.000         | 0.130         | 0.547         |

유정압 저널 베어링의 온도 상승은 자체 열 전달률의 영향을 크게 받는다는 점, 그리고 풀리 서포트 베어링과 풀리의 열 전달률은 GW 주축계의 유정압 저널 베어링의 온도 상승에 큰 영향을 주지 않다는 사실을 확인할 수 있다.

4.2 열 변형

초정밀 무심 연삭기의 열 변형 해석은 온도 상승에 대한 해석 결과를 토대로 수행하였으며, 특히 가공 정밀도에 큰 영향을 주는 GW와 RW 사이의 상대 열 변위를 파악하는 데 초점을 두었다. Fig. 10은 초정밀 무심 연삭기의 GW 주축계와 RW 주축계에 대한 열 변형 분포를 단면도 형태로 보여주고 있으며, GW 주축과 RW 주축의 수평 방향 열 변위와 수직 방향 열 변위는 그래프 형태로 Fig. 11에 제시하였다.

폐물의 가공 정밀도에 영향을 주는 것은 주축 전체의 열 변위 편차가 아니라 Fig. 11에 점선들로 표시한 GW와 RW 장착부 사이의 상대 열 변위 편차이다. 이러한 관점에서 얻은 GW와 RW 사이의 수평 방향의 상대 열 변위는 7.368~7.464 μm이고, 수직 방향의 상대 열 변위는 14.753~ 15.396 μm로 나타났다. 따라서 GW와 RW 사이의 수평 방향과 수직 방향의 상대 열 변위 편차는 각각 0.096 μm와 0.643 μm임을 알 수 있다.

Table 11은 GW와 RW 사이의 수평 방향과 수직 방향의 상대 열 변위 편차에 대한 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링, 풀리 서포트 베어링 및 풀리의 열 전달률의 영향을 민감도 형태로 나타낸 것이다. 특히 가공 정밀도에 큰 영

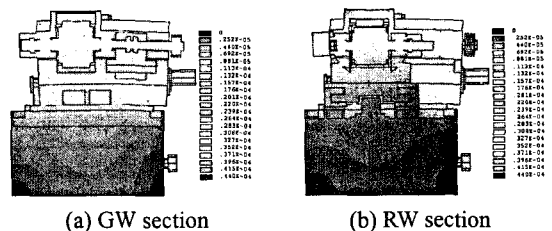


Fig. 10 Thermal deformation of the virtual prototype

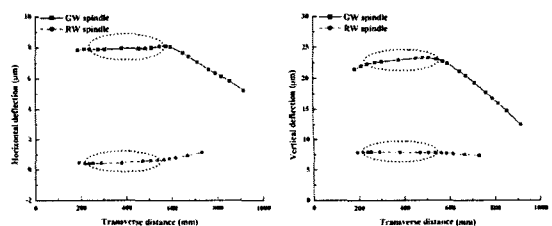


Fig. 11 Thermal deflection of the GW and RW spindles

**Table 11** Sensitivity of heat transfer rates with respect to thermal deflection deviation between GW and RW

| Heat source                      | Horizontal sensitivity (%/%) | Vertical sensitivity (%/%) |
|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Hydrostatic journal bearing (GW) | 1.771                        | -1.789                     |
| Hydrostatic journal bearing (RW) | 1.875                        | 0.420                      |
| Pulley-support bearing           | -0.521                       | 0.451                      |
| Pulley                           | -1.458                       | 1.820                      |

향을 주는 수평 방향의 상대 열 변위 편차에 대한 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 열 전달률의 민감도는 1.771 %/%와 1.875 %/%이고, 풀리 서포트 베어링과 풀리의 열 전달률의 민감도는 -0.521 %/%와 -1.458 %/%인 것으로 나타났다. 따라서 GW와 RW 사이의 수평 방향의 상대 열 변위 편차는 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 열 전달률이 증가하는 경우에는 함께 증가하지만, 풀리 서포트 베어링과 풀리의 열 전달률이 증가하는 경우에는 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 풀리 서포트 베어링과 풀리의 열 전달률이 증가하면 GW와 RW 사이의 수평 방향의 상대 열 변위 편차가 감소하는 원인은 Fig. 11(a)에서 볼 수 있듯이 풀리 서포트 베어링과 풀리가 설치된 GW 주축의 우측 부분에 대한 수평 방향의 열 변위가 다른 부분보다 작고, 점선으로 표시한 GW와 RW 장착부 사이의 수평 방향의 상대 열 변위도 우측 부분이 좌측 부분보다 약간 작기 때문에 풀리 서포트 베어링과 풀리의 열 전달률의 증가에 의해서 GW 주축의 우측 부분에 대한 수평 방향의 열 변위가 증가하게 되면 GW와 RW 장착부 사이의 우측 부분의 상대 열 변위도 증가하게 됨으로써 GW와 RW 사이의 수평 방향의 상대 열 변위 편차가 감소하게 되는 현상이 기인한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 유정압 베어링 기반의 주축계와 유정압 안내면 기반의 이송계를 채용한 페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기의 구조적 및 열적 설계의 변화가 성능 변화에 미치는 영향을 평가하기 위해서 초정밀 무심 연삭기의 구조적 및 열적 민감도 해석을 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 가공 정밀도에 큰 영향을 주는 초정밀 무심 연삭기의 수평 방향 루프 강성은 95.0 N/ $\mu\text{m}$ 이며, 0.248 %/%의 민감도를 갖는 RW 테이블 이송계의 유정압 안내면의 수직 방향 강성에 의해서 가장

큰 영향을 받는다. 이와 같이 유정압 안내면의 수직 방향 강성이 수평 방향 루프 강성에 큰 영향을 미치는 원인은 수평 방향 연삭력에 의해서 야기되는 RW 주축대의 굽힘 변형이 유정압 안내면의 피치 운동에 의해서 크게 증대되기 때문인 것으로 나타났다.

(2) 초정밀 무심 연삭기의 수평 방향 루프 강성에 대한 RW 테이블 이송계의 볼 스크류 기구의 축 방향 강성의 민감도는 0.010 %/%로 매우 작게 나타났다. 이러한 사실은 RW의 수평 방향 변위가 볼 스크류 기구의 축 방향 변형보다 RW 주축대의 굽힘 변형에 의해서 더 많이 야기된다는 점, 그리고 볼 스크류 기구가 고강성화 설계되었다는 점을 보여준다.

(3) 초정밀 무심 연삭기의 수직 방향 루프 강성은 193.4 N/ $\mu\text{m}$ 로 예측되며, 수평 방향 루프 강성의 경우와 달리 0.044 %/%의 민감도를 갖는 유정압 안내면의 수직 방향 강성보다 각각 0.111 %/%와 0.103 %/%의 민감도를 갖는 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 강성에 의해서 더 큰 영향을 받는다.

(4) GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 온도 상승은 각각 5.80 °C와 2.28 °C로 예측된다. 그리고 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 열 전달률은 이러한 자체 온도 상승에 크게 기여하지만, 풀리 서포트 베어링과 풀리의 열 전달률은 GW 주축계의 유정압 저널 베어링의 온도 상승에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

(5) 가공 정밀도에 큰 영향을 주는 GW와 RW 사이의 수평 방향의 상대 열 변위 편차는 0.096  $\mu\text{m}$ 이다. 그리고 수평 방향의 상대 열 변위 편차는 GW 주축계와 RW 주축계의 유정압 저널 베어링의 열 전달률이 증가하는 경우에는 함께 증가하지만, 풀리 서포트 베어링과 풀리의 열 전달률이 증가하는 경우에는 오히려 감소하는 경향이 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 “고기능성 부품 가공용 지능형 연삭 시스템 개발” 과제의 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Takeuchi, Y., Mitachi, S. and Nagase, R., 1997, “High-Strength Class-Ceramic Ferrule for SC-Type

- Single-Mode Optical Fiber Connector,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 9, No. 11, pp. 1502~1504.
- (2) Rowe, W. B., Miyashita, M. and Koenig, W., 1989, “Centerless Grinding Research and its Application in Advanced Manufacturing Technology,” *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 2, pp. 617~626.
- (3) Cho, S. J., Kim, H. G., Ebihara, T., and Tuskisima, H., 2003, “The Study on the Development of Ultra Precision Centerless Grinder,” *Journal of KSPE*, Vol. 20, No. 6, pp. 11~14.
- (4) Park, C. H., Hwang, J. H. and Cho, S. J., 2002, “A Study on the Feeding System of Centerless Grinder for Machining the Ferrule,” *Proc. of KSPE*, pp. 65~69.
- (5) Kim, S. I., Park, C. H. and Cho, S. J., 2004, “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.
- (6) Kim, S. I. and Cho, J. W., 2005, “Structural Characteristic Analysis of a High-Precision Centerless Grinding Machine with Concrete-Filled Bed,” *Journal of KSPE*, Vol. 22, No. 2, pp. 172~179.
- (7) Kim, S. I. and Cho, J. W., 2006, “Thermal Characteristic Analysis of a High-Precision Centerless Grinding Machine for Machining Ferrules,” *Journal of KSPE*, Vol. 23, No. 1, pp. 193~200.