

# 콘크리트 충전 베드를 적용한 초정밀 무심 연삭기의 구조 해석

김석일<sup>#</sup>, 조재완<sup>\*</sup>

## Structural Characteristic Analysis of a High-Precision Centerless Grinding Machine with Concrete-Filled Bed

Seok Il Kim<sup>#</sup> and Jae Wan Cho<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

A high-precision centerless grinding machine has been recognized as a core equipment performing the finish outer-diameter grinding process of ferrules which are widely used as fiber optic connectors. In this study, in order to realize the high-precision centerless grinding machine, the structural characteristic analysis and evaluation are carried out on the virtual prototype consisted of the steel bed, hydrostatic GW and RW spindle systems, hydrostatic RW feed mechanism, RW swivel mechanism, and on-machine GW and RW dressers. The loop stiffnesses of centerless grinding machine are estimated based on the relative deformations between GW and RW caused by the grinding forces. And the simulated results illustrate that the concrete-filled bed has the considerable effect on the improvement of the structural stiffness of centerless grinding machine.

**Key Words :** High-precision centerless grinding machine (초정밀 무심 연삭기), Concrete-filled bed (콘크리트 충전 베드), Grinding wheel (GW, 연삭 스톨), Regulating wheel (RW, 조정 스톨), Loop stiffness (루프 강성), Ferrule (페룰)

### 1. 서론

무심 연삭기는 공작물을 척이나 센터에 고정하지 않고 원통형 내면 및 외면을 연삭할 수 있기 때문에 생산성이 높고, 작업자의 숙련도와 관계없이 정밀 제품을 용이하게 가공할 수 있다는 장점을 가지고 있다.<sup>1,2</sup> 따라서 최근에는 광통신 정보의 전송 효율과 품질을 좌우하는 초정밀 핵심 부품인 페룰<sup>3</sup>의 마무리 외경 연삭을 고능률적으로 수행하기 위한 핵심 장비로서 초정밀 무심 연삭기에 대

한 연구 개발의 필요성이 높아지고 있다.

일반적으로 페룰은 세라믹 재료인 지르코니아( $ZrO_2$ )로 제작되고, 요구 정밀도가 대부분  $1 \mu m$  이하이며, 특히 외경 치수, 원통도, 진원도, 표면조도 등이 매우 엄격하게 규제되고 있다. 무심 연삭기로 페룰의 외경 연삭을 수행하는 경우에는 페룰의 외경 치수와 원통도는 RW(regulating wheel) 테이블 이송계의 축방향 강성과 이송 정밀도에 의한 영향을 많이 받고, 진원도와 표면조도는 GW(grinding wheel) 주축계와 RW 주축계의 회전 정밀도에 의

접수일: 2004년 6월 17일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

# 교신저자: 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail: sikim@hau.ac.kr Tel: (02) 300-0176

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원

한 영향을 많이 받게 된다. 따라서 폐를 가공하기 위한 무심 연삭기는 일반적인 무심 연삭기에 비해서 기계 구조의 고강성화와 고정밀화가 요구되는데, 그 중에서도 RW 테이블 이송계, GW 주축계 및 RW 주축계에 대한 대책이 중요하다.

폐를 가공용 초정밀 무심 연삭기와 관련하여 Cho 등<sup>4</sup>은 초정밀 무심 연삭기를 구현하기 위해서 요구되는 성능과 기능들에 대해서 검토하였고, Lee 등<sup>5</sup>은 초정밀 무심 연삭기의 기상 드레싱 장치를 제작하고 그 성능을 평가하였다. 그리고 Park 등<sup>6</sup>은 초정밀 무심 연삭기의 유정압 이송계에 대한 강성, 운동 정밀도, 미소 분해능, 위치 결정 오차 및 반복 오차를 실험적으로 파악하고 그 적용 가능성을 분석하였다. 이와 같이 폐를 가공용 초정밀 무심 연삭기와 관련된 기존 연구들은 모두 개념 검토나 실험 결과를 제시한 것들로 구조 설계 상의 문제들을 체계적으로 파악하고 그 개선 대책을 수립하기 위한 구조 해석학적인 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 폐를 가공용 초정밀 무심 연삭기의 개발 비용과 노력을 절감하고, 체계적인 설계 기술의 축적 및 성능 개선을 도모하기 위한 목적의 일환으로 초정밀 무심 연삭기의 설계 단계에서 구성 요소들이 구조 변형 및 강성에 미치는 영향을 평가하고, 그 결과로부터 제작 단계에서 요구 성능을 확보하기 위한 구조 특성 정보를 도출하는 데 그 초점을 두었다. 이를 위해서 초정밀 무심 연삭기의 유한 요소 모델을 구축한 후, 자중 및 연삭력이 초정밀 무심 연삭기의 구조 변형에 미치는 영향을 해석하였다. 연삭력에 의해서 야기되는 GW와 RW 사이의 상대 변위를 토대로 초정밀 무심 연삭기의 루프 강성을 평가하였고, 구조 변형에 대한 다양한 해석 결과를 토대로 실험적으로 파악하기 어려운 구조 강성의 저하 원인 및 오차의 발생 원인을 규명하였다. 특히 강제 베드 내에 콘크리트를 충전한 경우와 충전하지 않은 경우를 비교 분석함으로써 콘크리트 충전 베드의 적용이 초정밀 무심 연삭기의 고강성화 및 고정밀화에 상당 수준 기여한다는 사실을 입증하였다.

## 2. 초정밀 무심 연삭기의 구조 설계

### 2.1 연삭기

본 연구의 해석 대상인 폐를 가공용 초정밀 무

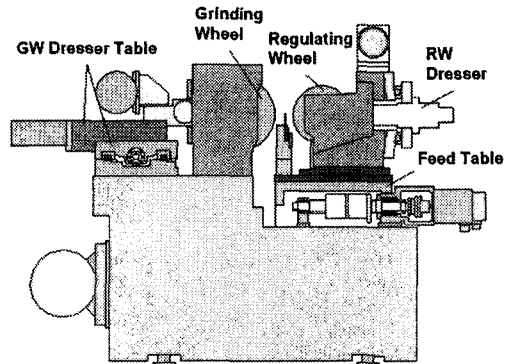


Fig. 1 Scheme of centerless grinding machine

Table 1 Specification of ferrule

Dimension	2.5× 10 mm	Accuracy	0.2 μm
Material	ZrO <sub>2</sub>	Roundness	0.1 μm
Roughness	0.5 μm R <sub>a</sub>	Cylindricity	0.5 μm

심 연삭기의 기본 구조는 Fig. 1에 제시하였다. 초정밀 무심 연삭기를 구조적인 측면에서 볼 때, GW 주축대는 베드 위에 설치되고, 공작물의 이동 속도를 조절하기 위해서 RW의 설치 각도를 조정하는 선회대가 부착된 RW 주축대는 이송 테이블 위에 설치된다. 또한 GW 주축대와 RW 주축대 후면에 GW와 RW의 기상 드레싱을 위한 전용 드레서를 위치시킴으로써 구조의 단순화와 연삭 작업의 효율화를 도모하였으며, 기계 구조의 고강성화를 위해서 강제 베드의 내부를 콘크리트로 충전하였다.

GW의 폭과 직경은 Table 1과 같은 제원을 갖는 폐를 10개씩 동시 가공될 수 있도록 150 mm와 250 mm로 설정하였고, RW의 폭과 직경은 폐를 연삭 공정으로 진입할 때의 정밀도를 고려해서 180 mm와 205 mm로 설정하였다. 또한 폐의 소재가 지르코니아라는 점을 고려해서 GW의 재질은 다이아몬드로 선정하였다.

### 2.2 주축계

초정밀 무심 연삭기의 주축계는 GW 주축계와 RW 주축계로 나누어진다. 특히 초정밀 무심 연삭기에서는 제품의 진원도와 표면조도가 주축계의 회전 정밀도에 의한 영향을 많이 받는다는 점을 고려해서 주축계의 베어링으로는 모두 유정압 베어링을 적용하였다. 그리고 연삭력에 의한 슷들의

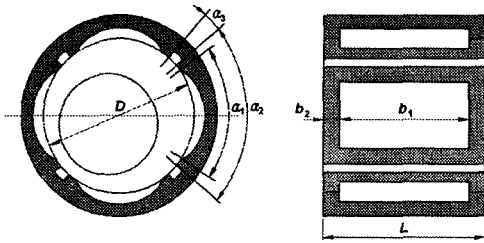


Fig. 2 Scheme of hydrostatic journal bearing

Table 2 Specification of hydrostatic journal bearing

Specifications	GW	RW
Diameter/Length	60, 60 mm	50, 50 mm
Angles $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	$63^\circ, 86.18^\circ, 3.82^\circ$	$62.5^\circ, 80.8^\circ, 9.2^\circ$
Axial length	48, 6 mm	40, 5 mm
Bearing clearance	$20 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m}$
Stiffness	$241 \text{ N}/\mu\text{m}$	$163 \text{ N}/\mu\text{m}$
Supply pressure	2 MPa	
Dynamic viscosity	5 cSt (40°C)	

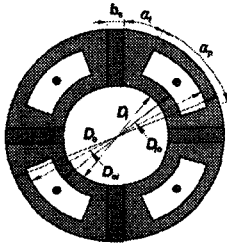


Fig. 3 Scheme of hydrostatic thrust bearing

Table 3 Specification of hydrostatic thrust bearing

Specifications	GW	RW
$D_i, D_{io}, D_{oi}, D_o$	64, 67, 77, 80 mm	54, 58, 68, 72 mm
Angle $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	$11.91^\circ, 63^\circ, 4^\circ$	$11.68^\circ, 63^\circ, 4^\circ$
Bearing clearance	$20 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m}$
Stiffness	$150 \text{ N}/\mu\text{m}$	$143 \text{ N}/\mu\text{m}$
Supply pressure	2 MPa	
Dynamic viscosity	5 cSt (40°C)	

처짐을 최소화하기 위해서 GW 와 RW 를 좌·우측 유정압 저널 베어링 사이에 모두 위치시키는 방법으로 주축계의 고강성화를 도모하였다.

Fig. 2 와 Table 2 는 초정밀 무심 연삭기의 GW 주축계와 RW 주축계에 적용된 유정압 저널(journal) 베어링의 형상과 주요 설계 제원, 그리고 Fig. 3 과 Table 3 은 유정압 스러스트(thrust) 베어링의 형상과 주요 설계 제원을 각각 보여주고 있다.<sup>7</sup>

### 2.3 이송계

초정밀 무심 연삭기의 가공 원리 때문에 제품의 외경 치수 정밀도와 원통도가 이송계(RW 테이블 이송계)의 정밀도 및 강성에 의한 영향을 많이 받게 된다는 점을 고려해서 이송계에는 유정압 안내 방식과 서보 모터-볼 스크류 구동 방식을 적용하였다. 특히 가공 부하는 이송계의 축방향(테이블의 이송방향)으로 대부분 작용하기 때문에 요구되는 제품의 가공 정밀도를 얻기 위해서는 이송계의 축방향 강성이 높아야 한다. 일반적으로 서보 모터-볼 스크류 구동 방식이 적용된 이송계의 축방향 강성을 향상시키기 위해서는 볼 스크류 기구의 강성을 크게 설계하는 것도 중요하지만, 지지 베어링의 브래킷(bracket)과 베드 연결부에서의 축방향 변형이 작아지도록 설계하는 것이 필요하다.

위와 같은 점들을 고려해서 이송계의 볼 스크류는 오버-사이즈 볼 예압 방식의 NSK PFT 4006-7.5, 그리고 서보 모터 측에 설치된 4 열의 지지 베어링은 앵글러 콘택트 볼 베어링 NSK 30TAC62 로 선정하였다. 이러한 요소들을 이용해서 설계한 이송계에서 지지 베어링의 강성  $K_b$  는  $2,011\text{N}/\mu\text{m}$ , 너트 강성  $K_n$  은  $659\text{N}/\mu\text{m}$ , 그리고 너트 위치에 따라서 달라지는 볼 스크류 축의 강성  $K_s$  는 기준 위치에서  $1,271\text{N}/\mu\text{m}$ 로 나타났다.<sup>8,9</sup> 따라서 식 (1)과 같이 표현되는 등가 강성 관계식<sup>8</sup> 으로부터 구한 볼 스크류 기구의 축방향 강성  $K_f$  는  $357\text{N}/\mu\text{m}$ 로 추정되었다.

$$\frac{1}{K_f} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_n} + \frac{1}{K_s} \quad (1)$$

유정압 안내면의 수직방향 강성은 Fig. 1 과 같이 이송 테이블에 설치되는 RW 주축대와 RW 드래서의 하중을 고려해서 설정해야 하고, 수평방향 강성은 제품의 치수 정밀도에 큰 영향을 미치는 이송 테이블의 요(yaw) 오차가 작게 되도록 설정할 필요가 있다. 따라서 유정압 안내면의 강성과 조립성 향상을 도모하기 위해서 유정압 안내면의 구조로는 Fig. 4 와 같이 레일이 유정압 베어링을 감싸는 양면 지지형 패드(double pad) 방식의 역구속형을 채용하였다. 또한 이송 정밀도를 높이기 위해서는 이송계의 좌우 대칭 구조화에 초점을 둔 설계와 함께, 유정압 베어링의 리세스(recess) 압력

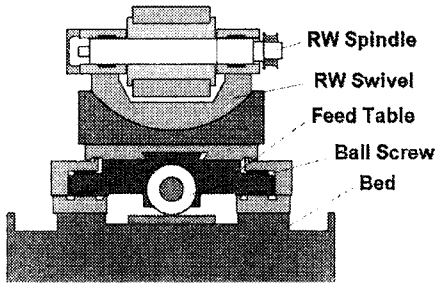


Fig. 4 Structure of hydrostatic guide way

Table 4 Specification of hydrostatic guide way

Specifications	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
Supply pressure	1 MPa	
Dynamic viscosity	5 cSt (40℃)	

에 의한 안내면 구조의 탄성 변형을 최소화하기 위한 대책이 요구된다. 이러한 개념들을 반영해서 도출한 유정압 안내면의 주요 설계 제원은 Table 4에 제시하였다.<sup>7</sup>

### 3. 초정밀 무심 연삭기의 구조 해석

#### 3.1 유한 요소 모델

본 연구에서는 페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기의 구조 특성을 평가하기 위해서 Fig. 5 와 같은 유한 요소 모델을 구축하였다. Fig. 6 은 초정밀 무심 연삭기의 구성을 이해하기 쉽도록 주요 모듈별로 유한 요소 모델을 분해해서 나타낸 것이다. 초정밀 무심 연삭기의 유한 요소 모델은 62,405 개의 절점, 그리고 74,112 개의 솔리드 요소와 167 개의 매트릭스 요소로 구성되었다. 특히 매트릭스 요소들은 볼 스크류 기구의 강성, 유정압 안내면의 패드 강성, 주축계의 유정압 저널 베어링과 스트러스트 베어링의 강성, 드레서의 안내면 및 베어링 강성 등을 표현하기 위해서 도입되었다.

초정밀 무심 연삭기를 구성하는 주요 구조 요소의 재료로는 베드 및 주축의 재료인 강재(SS440, SCM435), 테이블, 레일, 베어링 브래킷 등의 재료인 주철(GC300), 그리고 베드 내에 충전되는 콘크리트가 있다. 구조 특성 해석에서 사용한 구조 요

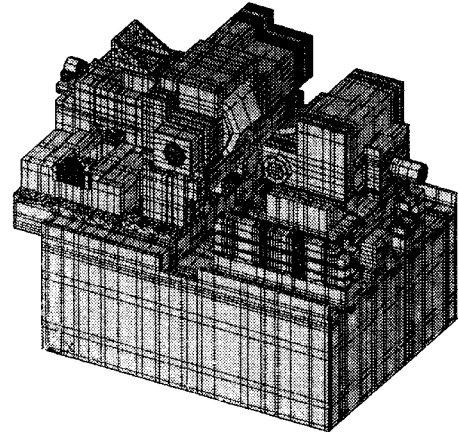


Fig. 5 Virtual prototype of grinding machine

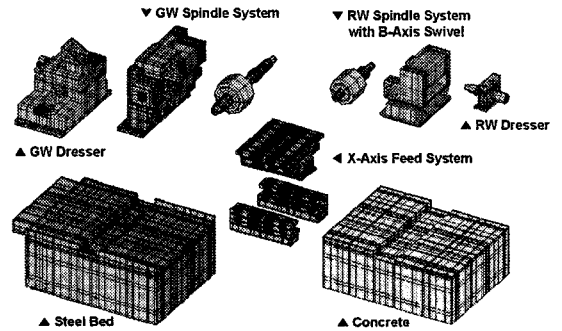


Fig. 6 Structural modules of virtual prototype

Table 5 Material properties of virtual prototype

Steel (SS400)	Young's modulus	200 GPa
	Density	7,850 kg/m <sup>3</sup>
	Poission's ratio	0.32
Steel (SCM435)	Young's modulus	205 GPa
	Density	7,850 kg/m <sup>3</sup>
	Poission's ratio	0.28
Cast iron (GC300)	Young's modulus	90 GPa
	Density	7,300 kg/m <sup>3</sup>
	Poission's ratio	0.25
Concrete	Young's modulus	27 GPa
	Density	2,320 kg/m <sup>3</sup>
	Poission's ratio	0.15

소의 물성은 Table 5에 나타내었다. 또한 Fig. 6에 나타낸 주요 모듈별 질량은 강재 베드 727kg, 콘크리트 791kg, 테이블 이송 기구(테이블, 레일, 볼

스크류, 브래킷 등) 265kg, GW 주축대(주축, 하우징 등) 344kg, RW 주축대(주축, 하우징 등) 228kg, GW 드레서 316kg, RW 드레서 27kg 이며, 초정밀 무심 연삭기의 총 질량은 약 2,698kg으로 평가된다.

### 3.2 구조 특성 해석

#### 3.2.1 자중에 의한 구조 변형

본 연구에서는 구조 해석 시의 경계 조건으로서 6 개의 베드 지지점을 모두 고정하였다. 그리고 자중 효과와 유정압 효과(유정압 베어링의 패드에 작용하는 기름의 압력 효과)를 고려하였다.

Fig. 7(a)와 (b)는 자중 효과와 유정압 효과를 고려해서 해석한 초정밀 무심 연삭기의 구조 변형을 투상도와 단면도로 나타낸 것이다. 특히 Fig. 7(b)에서 알 수 있듯이 RW 이송 테이블 위의 구조 요소들의 무게 중심이 테이블 중심에 대해서 RW 드레서 쪽으로 약 47mm 정도 치우쳐 있기 때문에 테이블 위의 구조 요소들이 시계방향으로 회전하여 RW 의 위치 오차를 유발하고 있는데, 이 문제는 테이블 위의 구조 요소들을 GW 주축대 쪽으로 약 47mm 만큼 이동시킴으로써 해결할 수 있다.

Table 6 은 베드 내에 콘크리트를 충전한 경우와 충전하지 않은 경우에 대한 좌·우측 레일의 수직 방향 변형량을 Fig. 8 에 표시한 측정점들에 대해서 비교 정리한 것이다. 초정밀 무심 연삭기의 최대 변형은 10.1  $\mu\text{m}$ 이며, 유정압 안내면 레일의 중앙 상단부에서 나타나고 있다. 이것은 유정압 효과에 의한 레일의 굽힘 변형(소리 굽쇠 형태의 변형) 때문에 발생하는 현상임을 Fig. 8 에서 확인할 수 있다. 그리고 이와 같은 레일의 굽힘 변형 때문에 좌·우측 유정압 안내면의 상단 간극은 각각 평균 4.15  $\mu\text{m}$ (1.25~7.06  $\mu\text{m}$ )와 4.62  $\mu\text{m}$ (1.34~7.89  $\mu\text{m}$ ) 정도 증가되는 것으로 예측되었다. 이러한 상단 간극의 증가에 의해서 유정압 안내면의 실제 강성은 설계 강성 960N/ $\mu\text{m}$ 보다 약 10% 정도 낮은 865N/ $\mu\text{m}$  수준이 될 것으로 예상된다. 또한 Table 6 에 제시한 바와 같이 베드 내에 콘크리트를 충전하지 않은 경우에는 좌·우측 유정압 안내면의 상단 간극이 각각 평균 5.00  $\mu\text{m}$ (2.00~8.00  $\mu\text{m}$ )와 5.74  $\mu\text{m}$ (2.33~9.15  $\mu\text{m}$ ) 정도 증가되는 것으로 예측되었는데, 이러한 사실로부터 콘크리트 충전 효과에 의해서 상단 간극의 증가량이 약 1  $\mu\text{m}$  정도 감소함을 알 수 있다.

Fig. 9 는 Fig. 7(a)의 좌측에서 우측으로 향하는 종방향으로 베드의 중앙선을 따라서 측정된 베드

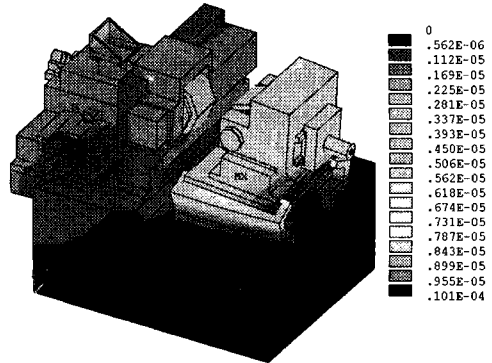


Fig. 7(a) Structural deformation of virtual prototype by gravity force

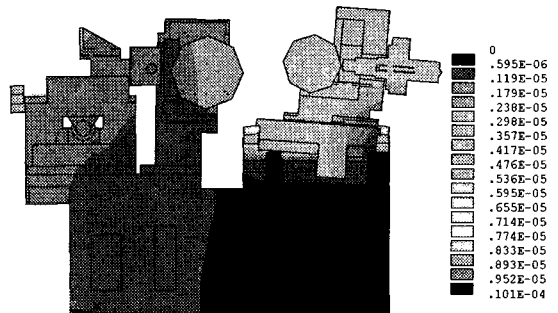


Fig. 7(b) Section view of structural deformation

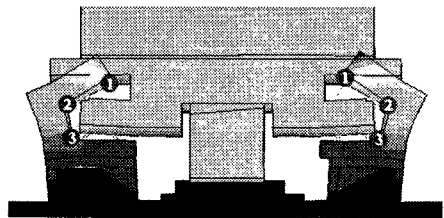


Fig. 8 Structural deformation of hydrostatic guide way

Table 6 Vertical deformation of hydrostatic guide way

Point	Bed with concrete ( $\mu\text{m}$ )		Bed without concrete ( $\mu\text{m}$ )	
	Left	Right	Left	Right
1	7.06	7.89	8.00	9.15
2	1.25	1.34	2.00	2.33
3	0.62	0.60	1.38	1.60

상판의 처짐을 보여주고 있다. 종방향의 처짐 그래프에서는 좌측으로 갈수록 베드 상판이 더 많이 내려앉는 것으로 나타났는데, 그 주원인은 베드의 좌측에 탑재되는 GW 드레서(316kg)와 GW 주축대(344kg)의 무게가 베드의 우측에 탑재되는

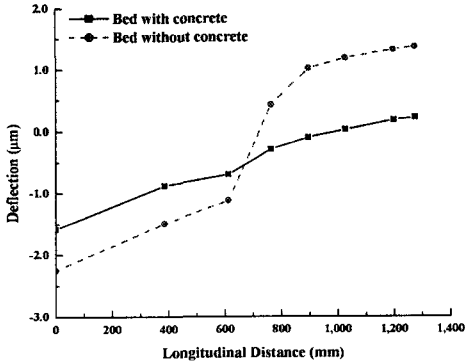


Fig. 9 Deflection of upper bed plate in longitudinal direction

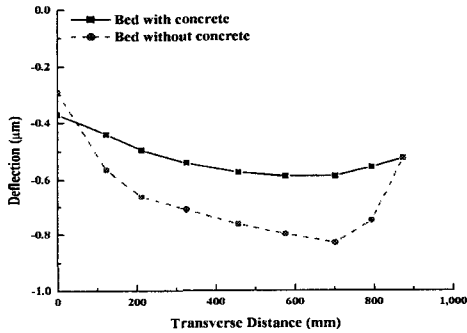


Fig. 10 Deflection of upper bed plate in transverse direction

테이블 이송 기구(265kg), RW 주축대(228kg) 및 RW 드레서(27kg)의 무게보다 더 무겁다는 데 있다. Fig. 10 은 Fig. 7(a)의 전면에서 후면으로 향하는 횡 방향으로 베드의 중앙선을 따라서 측정한 베드 상판의 처짐을 보여주고 있다. 횡방향의 처짐 그래프로부터 베드 상판의 후면이 전면보다 더 처지는 것을 알 수 있는데, 이것은 측정 부위에 가장 큰 영향을 미치는 GW 주축대의 무게 중심이 후면 쪽에 치우쳐 있기 때문에 파악되었다. 그리고 이러한 현상이 베드 내에 콘크리트를 충전하지 않은 경우가 종방향에 대해서 약 100%, 횡방향에 대해서 약 150% 정도 더 크게 나타난다는 사실은 콘크리트 충전 효과가 초정밀 무심 연삭기의 고강성화에 상당 수준 기여한다는 것을 의미한다.

### 3.2.2 수평방향 루프 강성

초정밀 무심 연삭기의 수평방향 루프 강성을

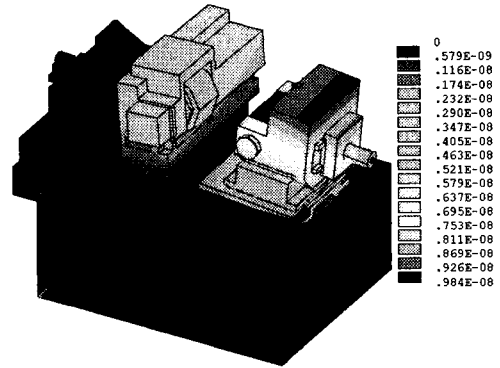


Fig. 11(a) Structural deformation of virtual prototype by horizontal unit grinding force

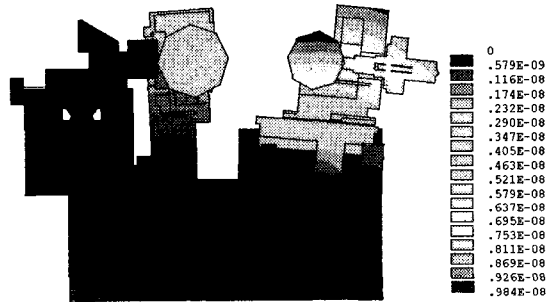


Fig. 11(b) Section view of structural deformation

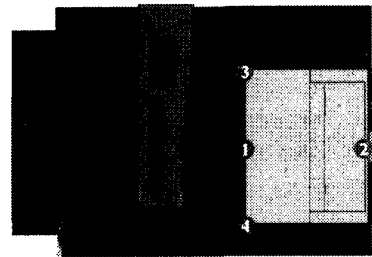


Fig. 12 Displacement of RW feed table (section view)

Table 7 Displacement of RW feed table

Point	Bed with concrete (μm)		Bed without concrete (μm)	
	Axial	Vertical	Axial	Vertical
1	0.0036	0.0027	0.0041	0.0031
2	0.0036	-0.0025	0.0041	-0.0026
3	0.0036	0.0026	0.0041	0.0030
4	0.0036	0.0026	0.0041	0.0030

평가하기 위해서 GW 와 RW 의 중앙부에 수평방향 연삭력 1N 을 서로 반대 방향으로 부가시킨 상

태에 대한 구조 변형을 해석하였다. Fig. 11 은 수평 방향 연삭력에 의한 초정밀 무심 연삭기의 구조 변형을 보여주고 있고, Table 7 은 RW 이송 테이블의 축방향과 수직방향 변위를 Fig. 12 의 측정점들에 대해서 나타낸 것이다.

Table 7 에 제시한 점 3(테이블의 전면 좌측)과 4(테이블의 전면 우측)에서의 테이블의 축방향 변위차가 0.0  $\mu\text{m}$ 라는 사실로부터 테이블의 요 오차는 거의 발생하지 않을 것으로 판단되며, RW 테이블 이송계의 좌우 대칭성이 우수함을 확인할 수 있다. 또한 수평방향 연삭력에 의한 테이블의 피치(pitch) 오차는 Table 7 에 제시한 점 1(테이블의 전면 중앙)과 2(테이블의 후면 중앙)에서의 테이블 상면의 수직방향 변위차 0.0052  $\mu\text{m}$ 와 비례하는 관계에 있는데, 베드 내에 콘크리트를 충전하지 않은 경우의 점 1 과 2 에서의 테이블 상면의 수직방향 변위차가 0.0057  $\mu\text{m}$ 라는 사실로부터 콘크리트 충전 효과에 의해서 테이블의 피치 오차가 약 10% 정도 감소함을 알 수 있다.

수평방향 연삭력 1N 이 작용하는 경우, GW 와 RW 의 수평방향 변위는 각각 -0.0038  $\mu\text{m}$ 와 0.0082  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 따라서 초정밀 무심 연삭기의 수평방향 루프 강성은 83.3  $\mu\text{m}/\text{N}$  인 것으로 평가할 수 있다. 그리고 콘크리트를 충전하지 않은 경우에는 GW 와 RW 의 수평방향 변위가 -0.0048  $\mu\text{m}$ 와 0.0090  $\mu\text{m}$  로 주어지기 때문에 수평방향 루프 강성이 72.5  $\mu\text{m}/\text{N}$  인 것으로 예측된다. 이러한 사실은 콘크리트 충전 효과를 통해서 수평방향 루프 강성이 약 15% 정도 향상되었음을 보여주는 것이다.

또한 수평방향 연삭력에 의한 RW 의 변위가 GW 의 변위보다 상대적으로 크게 나타난 이유는 Fig. 11(b)에서 알 수 있듯이 RW 이송 테이블의 피치 오차에서 찾을 수 있다. 결과적으로 초정밀 무심 연삭기의 수평방향 루프 강성을 향상시키기 위해서는 먼저 RW 이송 테이블의 피치 오차를 줄이기 위한 대책이 요구된다고 할 수 있다.

### 3.2.3 수직방향 루프 강성

초정밀 무심 연삭기의 수직방향 루프 강성은 GW 와 RW 의 중앙부에 수직방향 연삭력 1N 을 서로 반대 방향으로 부가시킨 상태에 대한 구조 변형을 해석함으로써 평가하였다. 수직방향 연삭력에 의한 초정밀 무심 연삭기의 구조 변형은 Fig. 13 에 제시하였다.

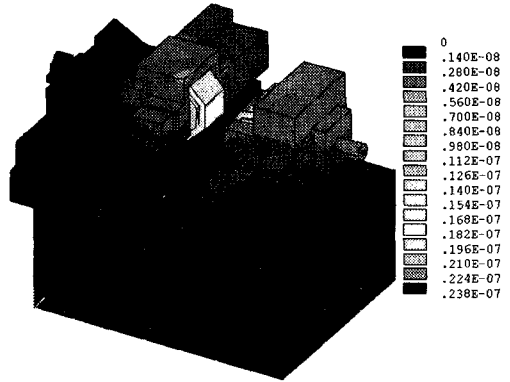


Fig. 13(a) Structural deformation of virtual prototype by vertical unit grinding force

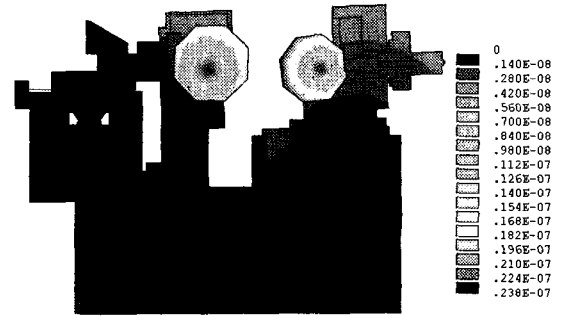


Fig. 13(b) Section view of structural deformation

수직방향 연삭력 1N 이 작용하는 경우, GW 와 RW 의 수직방향 변위는 각각 0.0024  $\mu\text{m}$ 와 -0.0037  $\mu\text{m}$ 로 얻어졌다. 따라서 초정밀 무심 연삭기의 수직방향 루프 강성은 163.9  $\mu\text{m}/\text{N}$  인 것으로 평가된다. 그리고 콘크리트를 충전하지 않은 경우에는 GW 와 RW 의 수직방향 변위가 0.0026  $\mu\text{m}$ 와 -0.0038  $\mu\text{m}$ 로 주어지기 때문에 수직방향 루프 강성이 156.3  $\mu\text{m}/\text{N}$  인 것으로 예측된다. 이러한 사실로부터 콘크리트 충전 효과를 통해서 수직방향 루프 강성이 약 5% 정도 향상되었음을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 페룰 가공용 초정밀 무심 연삭기의 설계 결과를 토대로 구축한 유한 요소 모델을 이용해서 자중 및 연삭력이 초정밀 무심 연삭기의 구조 변형에 미치는 영향을 해석 및 평가하였다. 특히 베드 내에 콘크리트를 충전한 경우와

충진하지 않은 경우를 비교 분석함으로써 콘크리트 충전 베드의 적용이 초정밀 무심 연삭기의 고강성화 및 고정밀화에 상당 수준 기여한다는 사실을 보여주었다. 그리고 그 과정에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 유정압 효과에 기인한 레일의 굽힘 변형 때문에 유정압 안내면의 상단 간극이 평균 4.15~4.62  $\mu\text{m}$  정도 증가되어 유정압 안내면의 실제 강성은 설계 강성 960N/ $\mu\text{m}$ 보다 약 10% 낮은 865N/ $\mu\text{m}$  수준이 될 것으로 예측된다. 또한 베드 내의 콘크리트 충전 효과에 의해서 상단 간극 증가량이 약 20% 정도 감소하였다.
- 2) RW 이송 테이블 위의 구조 요소들의 무게 중심이 RW 드레서 쪽으로 편중되어 발생하는 RW의 위치 오차를 최소화하기 위해서는 구조 요소들의 설치 위치를 GW 주축대 쪽으로 47mm 정도 이동시켜서 구조 요소들의 무게 중심과 테이블 중심을 서로 일치시킬 필요가 있다.
- 3) 자중에 의해서 GW 주축대 쪽의 베드 상판이 RW 주축대 쪽보다 더 처지고, 후면의 베드 상판이 전면보다 더 처지는 것으로 나타났다. 특히 콘크리트를 충전하지 않은 경우의 중방향 처짐이 약 100%, 횡방향 처짐이 약 150% 정도 증가된다는 사실은 콘크리트 충전이 초정밀 무심 연삭기의 고강성화에 상당 수준 기여하고 있음을 의미한다.
- 4) 수평방향 연삭력에 의한 RW 이송 테이블의 피치 오차는 베드 내의 콘크리트 충전 효과에 의해서 약 10% 정도 감소됨을 확인하였다.
- 5) 수평방향 연삭력에 의한 RW 이송 테이블의 요오차는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났는데, 이러한 사실은 테이블 이송계가 좌우 대칭 구조로 잘 설계되었음을 보여준다.
- 6) 초정밀 무심 연삭기의 수평방향과 수직방향 루프 강성은 각각 83.3  $\mu\text{m}/\text{N}$  과 163.9  $\mu\text{m}/\text{N}$  으로 예측된다. 특히 콘크리트를 충전하지 않은 경우와의 비교를 통해서 콘크리트 충전 효과가 수평방향과 수직방향 루프 강성을 각각 약 15%와 5% 정도 증가시킴을 확인하였다.

의 세부 과제인 "고정밀 이송/제어 시스템 개발"의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. Rowe, W.B., Spraggett, S., Gill, R. and Davies, B.J., "Improvements in centreless grinding machine design," *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 207-210, 1987.
2. Rowe, W. B., Miyashita, M. and Koenig, W., "Centerless Grinding Research and its Application in Advanced Manufacturing Technology," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 2, pp. 617-626, 1989.
3. Takeuchi, Y., Mitachi, S. and Nagase, R., "High-Strength Class-Ceramic Ferrule for SC-Type Single-Mode Optical Fiber Connector," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 9, No. 11, pp. 1502-1504, 1997.
4. 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.
5. Lee, E. S., Cho, C. R. and Park, B. J., "Development of Rotary Diamond Dressing System of Centerless Grinder for Ferrule Grinding," *Journal of KSPE*, Vol. 20, No. 6, pp. 15-19, 2003.
6. 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.
7. Park, C. H., "Design and Performance Evaluation on the Motion Elements of Centerless Grinder," 3<sup>rd</sup> Mid-Evaluation Workshop of Intelligent Grinding System, 2004.
8. NSK, "Precision Machinery Product," *NSK Catalog No.3101*, 1993.
9. THK, "Linear Motion System", *THK Catalog No.100-1K*, 1991.

### 후 기

본 연구는 산업자원부의 중기거점사업인 "고기능성 부품 가공용 지능형 연삭 가공 시스템 개발"