

◆ 특집 ◆ 차세대 하이브리드 연삭시스템

## 차세대 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템의 개발

### The Development of Hybrid Vertical Grinding System

최승건<sup>1</sup>, 김성현<sup>1</sup>, 최웅걸<sup>1</sup>, 이은상<sup>1,✉</sup>, 최지훈<sup>2</sup>, 이석주<sup>2</sup>, 김규동<sup>2</sup>  
Seung Geon Choi<sup>1</sup>, Seong Hyun Kim<sup>1</sup>, Woong Kirl Choi<sup>1</sup>, Eun Sang Lee<sup>1,✉</sup>, Ji Hun Choi<sup>2</sup>,  
Seok Joo Lee<sup>2</sup>, and Kyu Dong Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 인하대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, inha Univ.)

<sup>2</sup> 대영기계공업 (Dae Young Machinery)

✉ Corresponding author: leees@inha.ac.kr, Tel: +82-32-860-8778

Manuscript received: 2013.9.26 / Accepted: 2013.10.24.

*Machine tools are the cores of industrial development in recent period. It is difficult to develop a system which can do cutting and grinding process in the one system. Hybrid Vertical Grinding System is capable of processing in a single apparatus cutting or grinding. The modal analysis and structural analysis for the development of Hybrid Vertical Grinding System is the first time of domestic work. This paper describes the technologies of Hybrid Vertical grinding machine and intend to introduce the studies in the development of the Hybrid Vertical Grinding System.*

Key Words: Hybrid Vertical Grinding System (복합연삭시스템), Bed (베드), Structural Analysis (구조해석), Modal Analysis (모달해석), Main Spindle (주축 스피들), Electro Spindle (고주파스핀들)

#### 1. 서론

공작기계는 산업발전을 주도하는 핵심 첨단 설비이다. 공작기계를 생산하기 위해서는 설계기술, 가공기술, 제어기술등과 같은 고도의 기술들이 요구되고 있다.

현대의 모든 산업분야에서는 정밀한 부품이 다양한 형태로 이용되고 있으며 점차 산업이 발달하면서, 새로운 첨단산업이 발달하게 되고 품질향상을 위해 기존보다 더욱 정밀한 부품을 필요로 하게 되었다. 이러한 부품이나 기계의 정밀도를 향상시키는 가공공정으로는 여러 가지 방법이 있으나 그 중에 연삭가공은 부품의 정밀도 향상과 대량생산을 위한 정밀가공법 중 가장 중요한 공정이다.<sup>1,2,4</sup>

그 중, 하이브리드 연삭시스템은 기존의 연삭

공정과 선삭공정을 하나의 장비에서 작업을 진행할 수 있으며, 좀 더 복잡화, 고효율화, 자동화, 고속화하여 제품의 생산효율을 극대화 하는 연삭시스템이다.

다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템은 다품종 소량생산이나 자동차의 부품 가공공정 등 여러 가지의 기종 변경에 유연대응이 가능한 연삭시스템이다.

국내 시장에서는 최초로 개발이 되고 있으며, 개발이 완성 된다면 공간의 활용성을 높이면서 순수 국내기술로서 세계시장에 수출을 기대할 수 있다. 공작기계에 있어서 강성은 가공정밀도와 표면거칠기와 같은 공작물의 품질에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 이송계, 주축 등 주요한 유닛의 경우에는 공작기계의 안정성과 가공정밀도 향상을 위한 중요한 요소이다. 공작기계 베드에 대한 정

강성 및 진동에 관한 특성과 주요유닛의 개발완성까지 구조적으로 공작기계의 안정성을 확보하는 것이 중요하다.<sup>5,6</sup>

본 논문에서는 기존의 공작기계의 베드 해석과는 다른 연삭공정과 선삭공정이 하나의 장비에서 가능한 다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템의 개발 하는데 필요한 요소들에 대해서 소개를 하고 현재 진행되고 있는 연구내용을 소개하고자 한다.

## 2. 모델링과 베드 재료선정

고정밀의 다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭 시스템을 실현하기 위해서는 공작기계가 충분한 강성을 유지해야 된다. 따라서 주축의 고속회전 중에도 진동특성이 뛰어나며, 정밀가공을 위한 높은 회전정밀도를 유지할 수 있는 베드가 필요하다.<sup>3</sup>

### 2.1 베드의 모델링

본 연구에서는 SolidWorks 2010을 사용하여 다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템 베드의 3D 모델링을 수행하였으며, 신뢰성 향상을 위하여 2D 도면을 바탕으로 동일한 형상을 갖는 주요 유닛의 3D 모델을 완성 하였다.

Fig. 1은 다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭 시스템 베드의 3D 모델로서 베드의 상단부에 장착하게 될 이송계의 임의의 더미를 추가하여 이송계 하중 350Kg을 추가하여 모델링을 완성하였다. 또한, 가공물이 로딩 되는 Loading position, 측정하는 Gauging position, 연삭을 하는 Grinding position, 선삭가공을 하는 Turning position별로 더미의 위치를 변경하여 모델링을 완성 하였다.

### 2.2 고강성베드의 재료 선정

공작기계의 베드는 주축, 이송계, 테이블과 공작물의 하중을 모두 지지해야 하며, 강성이 우수하여, 변형에 안정적으로 설계, 제작되어야 한다. 또한, 주축의 고속회전, 이송계의 고속 운동에 의해 발생 되는 진동에 우수한 감쇠성능을 가지고 있어야 한다.

이에 다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템에 적용 될 베드는 SS41와 주철(FC300) 재료의 베드 정특성과 동특성을 통하여 선정하였다. Table 1은 SS41와 FC300에 관한 재료물성치 이다.

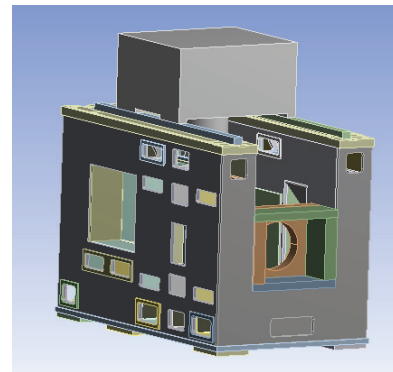


Fig. 1 3D Modeling of Vertical Grinding System Bed

Table 1 Specification of SS41 and FC300

Material	Tensile Strength [MPa]	Youngs Modulus [GPa]	Rigidity [GPa]	Elongation
SS41	400~550	200	80	20%
FC300	276	100	40	1%

### 2.3 베드의 구조해석

다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템의 제작 시 비용 절감과 구조적인 강성을 강화하기 위해 SS41과 FC300에 대해 구조해석을 진행 하였다. 다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템에서 다른 요소를 배제하고 각각의 포지션별로 자중과 더미의 하중만을 고려했을 경우의 해석 결과를 비교하였다. 선삭가공이 진행되는 Turning position에서는 가공부에 가공부하 500 kgf의 힘을 부여한 후, 하단 여섯 부분을 Fix시킨다음 해석을 진행하였다.

먼저, 베드의 성분을 주철로 하여, 각각의 포지션 별로 해석을 진행하였다. 그 결과 각 포지션 별로 Loading에서 7.4 μm, Gauging 7.78 μm Grinding 7.44 μm, Turning 15.57 μm으로 해석되었다. 강성을 높이기 위해서는 박스형 구조를 사용하는 방법도 있으나, 시스템의 전체적인 무게와 제작시의 비용 절감을 위하여, 해석 결과 변형량이 높은 부분의 강성을 높이기 위하여 추가적으로 상단부에 리브를 추가 설계한 후 재해석을 진행하였다. 베드에 리브를 추가하여 재해석한 결과 각 포지션 별로 Loading에서 6.68 μm, Gauging 6.80 μm, Grinding 6.73 μm, Turning 14.69 μm으로 해석되어졌으며, 리브를 추가하기 전보다 변형량이 평균 0.8 μm정도 감소한 것을 알 수 있다. Fig. 2는 베드에 리브를 추가하기 전과 추가한 후의 베드의 구조해석을 비

	Loading	Gauging	Grinding	Turning
CAST IRON BED				
Deformation	7.4um	7.78um	7.44um	15.57um
CAST IRON BED (SS41)				
Deformation	6.68um	6.80um	6.73um	14.69um

Fig. 2 Comparison of Cast Iron Bed

	Loading	Gauging	Grinding	Turning
CAST IRON BED				
Deformation	6.68um	6.80um	6.73um	14.69um
SS41 BED				
Deformation	3.80um	4.08um	3.82um	8.57um

Fig. 3 Comparison of Iron Cast Bed and SS41 Bed

교한 것이다. 각각의 포지션 별로 더미가 위치 하는 부분의 상단에 붉은색으로 변형량이 제일 크게 나타났으며, 하단 지지부가 파란색으로 변형량이 가장 작게 나타났다.

리브를 추가 설계한 모델링에 동일한 해석조건에서 베드의 성분을 SS41로 변경하여, 각각의 포지션 별로 해석을 진행하였다. SS41 성분의 베드 구조해석 결과 각 포지션 별로 Loading 3.80 μm, Gauging 4.08 μm, Grinding 3.82 μm, Turning에서 8.57 μm으로 해석되었다.

Fig. 3은 주철베드와 SS41의 베드를 해석결과를 비교한 것이다. SS41 베드가 평균 3 μm의 변형량이 감소하는 것을 알 수가 있었다. 각각의 포지션 별로 더미가 위치 하는 부분의 상단에 붉은색으로 변형량이 제일 크게 나타났으며, 하단 지지부가 파란색으로 변형량이 가장 작게 나타났다.

해석 결과 SS41의 재료가 주철보다 강성이 더욱 뛰어나다는 것을 알 수 있다.

### 2.4 베드의 모달해석

다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템의 구조해석을 진행 후, 감쇠능력을 확인하기 위하여

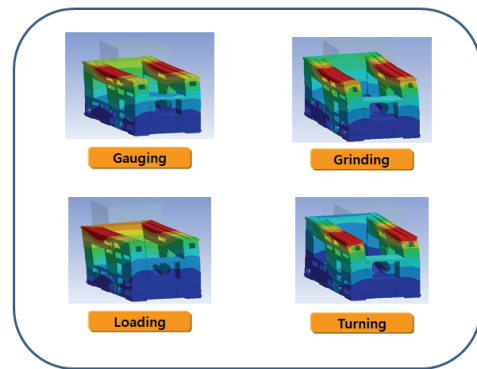


Fig. 4 Result of modal analysis (FC300)

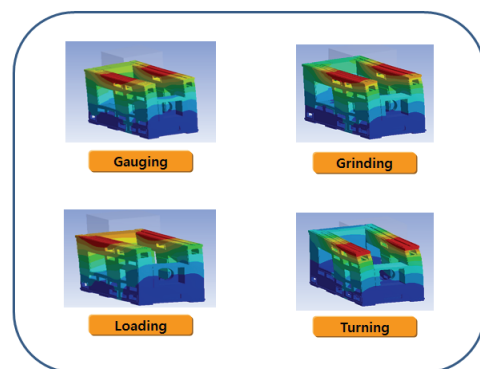


Fig. 5 Result of modal analysis (SS41)

재료별 모달해석을 진행 하였다. 먼저 재료를 주철로 부여하여 각 포지션 별로 해석을 진행하였다. 구속조건은 하단부 6부분을 고정하여 진행하였다.

해석 결과 1차 모드의 값이 Loading 63.229 Hz, Gauging 61.151Hz, Grinding 58.016 Hz, Turning 53.054 Hz가 나타났다. Fig. 4는 각 포지션별 1차 모드 해석 결과를 보여주고 있다. 더미가 있는 부분에 붉은 색으로 각 고유진동수일 경우의 변형하는 모습을 보여 주고 있다. 베드의 하단부분은 파란색으로 변형량이 가장 작게 나타났다.

그 다음은 재료를 SS41로 부여 하여 각 포지션 별로 모달해석을 진행하였다.

해석 결과 1차 모드의 값이 Loading 90.867 Hz, Gauging 87.734 Hz, Grinding 82.941 Hz, Turning 76.016 Hz로 나타났다. Fig. 5는 SS41재질 베드의 각 포지션별 해석 결과를 보여주고 있다. 더미가 있는 부분에 붉은 색으로 각 고유진동수일 경우의 변형하는 모습을 보여 주고 있다. 베드의 하단부분은 파란색으로 변형량이 가장 작게 나타났다.

Table 2 Results of modal analysis

Modal analysis			
SS41		Cast iron(FC300)	
Position	Frequency (Hz)	Position	Frequency (Hz)
1st		1st	
Loading	90.867	Loading	63.229
Gauging	87.734	Gauging	61.151
Grinding	82.941	Grinding	58.016
Turning	76.016	Turning	53.054

1차 모드의 해석 비교 결과, 주철재료의 베드가 SS41 베드보다 1차 고유진동수가 20~30 Hz 정도 낮은 결과를 보였다. 1차모드의 고유진동수가 30 Hz정도 높은 SS41 재료의 베드가 공진의 영향에서 베드의 재료로써 유리하다는 결과가 나타났다. Table 2는 SS41 재료와 FC300 재료의 1차 고유진동수를 비교한 표이다.

### 3. 주요 유닛의 설계 및 제작

다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭 시스템은 선삭 및 연삭 가공을 동시에 할 수 있는 구조로 가공물을 One Chucking한 상태에서 선삭과 연삭을 함으로써 가공물 Chucking에 따른 가공정도 문제를 해소할 수 있으며, Chucking Unit이 장착된 주축 스피ن들은 고속 이송 장치에 부착함으로써 가공물의 투입 및 배출 시간을 최소화 하고 일반적인 수직형 선반과 달리 가공물이 공구 위에 있기 때문에 Chip 배출이 용이한 구조로 되어있다.

다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭 시스템의 주요 유닛으로는 진동감쇠 강성이 뛰어난 기계 본체, Chucking Unit이 장착이 될 주축 스피ن들, 고속 이송계, 선삭 Tool 및 밀링 Tool 장착용 Turret, 내/외경 및 빗면 연삭이 가능한 고주파 스피ن들 등이 있다.

#### 3.1 주축스핀들

주축 스피ن들은 가공물(10"미만)을 Chucking할 수 있는 구조로 고속 이송 장치의 수직축(Z축)에 장착되어 가공물을 회전 및 공급/배출 시키는 역할을 한다. Built-in Motor를 사용하였으며 회전수는 5,500 RPM (최대 6,500 RPM까지 설치 가능), 최대 토크는 384 Nm, Front Bearing의 크기는 Ø85 mm 로 설계하였으며, Built-in Motor 및 Bearing의 온도

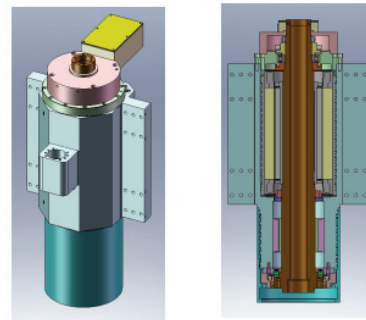


Fig. 6 Main Spindle Three Metric & Section

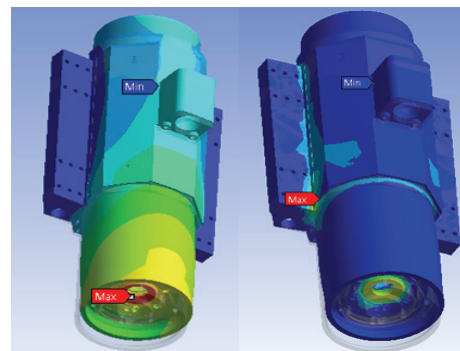


Fig. 7 Analysis of Vertical Grinding System Main spindle

제어를 위해 냉각 장치를 적용하였으며 Front Bearing의 발열상태를 모니터링 할 수 있도록 설계하였다.

다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템의 주축스핀들의 구조해석을 진행하였다. Fig. 7은 Main Spindle의 변형량과 응력을 해석한 결과이다. 변형량의 경우 Work를 Cucking하는 부분에서 최대 1.67 μm로 발생하였고 붉은색으로 표시되고 있으며, LM가이드와 연결 되는 부분은 파란색으로 변형량이 가장 작게 나타났다. 응력의 경우 LM 가이드 연결부분에서 최대 3.14 MPa로 발생하는 것으로 해석이 되었다.

#### 3.2 고주파스핀들

고주파 스피ن들은 가공물의 요구 정도에 따라 내경 및 외경부의 연마 공정이 필요한 경우 사용되며, 위에서 언급한 바와 같이 One Chucking한 상태에서 선삭 후 연삭을 바로 할 수 있는 장점이 있다. 고주파 스피ن들은 동력 18 kW, 최고 회전 속도 30000 RPM, Front Bearing Size는 Ø55 mm이며, 스



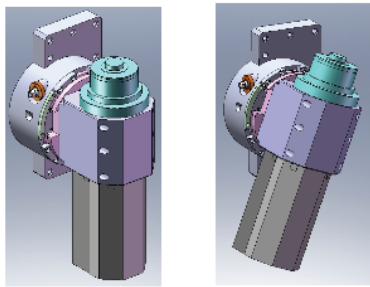


Fig. 8 Electro spindle revolve up to 20°

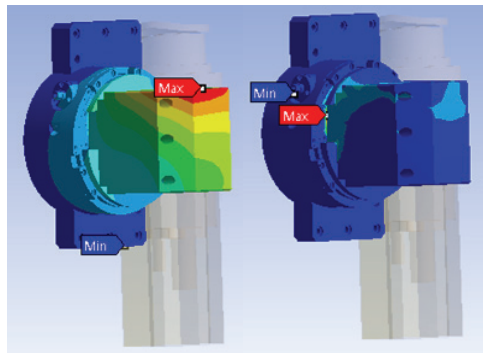


Fig. 9 Analysis of Vertical Grinding System Electro spindle

핀들의 발열을 막기 위해 냉각시스템을 적용하여 설계하였다. 또한 Work 의 경사면 연마를 위해 Fig. 8과 같이 고주파 스피들 장치를 최대 20°까지 선회시킬 수 있도록 설계하였다.

Fig. 9는 Electro Spindle의 변형량과 응력을 해석한 결과이다. 최대 변형량은 0.25  $\mu\text{m}$ 로 Spindle 고정 부분에서 붉은색으로 나타났고, 베드의 연결부분에는 푸른색으로 변형량이 가장 작게 나타났다. 최대응력은 0.85 MPa로 베드의 연결부분에서 발생하는 것으로 해석 되었다.

### 3.3 이송계 시스템

이송 기구는 X 축과 Z 축으로 이루어져 있으며, X축은 가공물 공급 및 배출, 가공물 측정, 연삭 및 선삭 총 4 Station으로 이루어지며, Z축에는 스피들을 장착할 수 있도록 설계하였다. X, Z축 각각의 최대 이송 속도는 최대 60 m/min과 40 m/min이며 Roller type의 LM Guide를 사용하였다. 또한 고정밀 위치제어를 위해 각축에는 최대 0.01  $\mu\text{m}$  제어가 가능한 Linear Scale을 부착할 수 있도록 설계가 되어 있다.

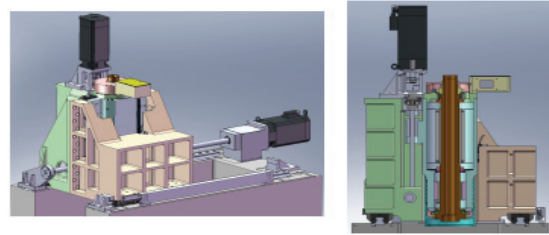


Fig. 10 Feed Unit Three Metric & Z axis Section

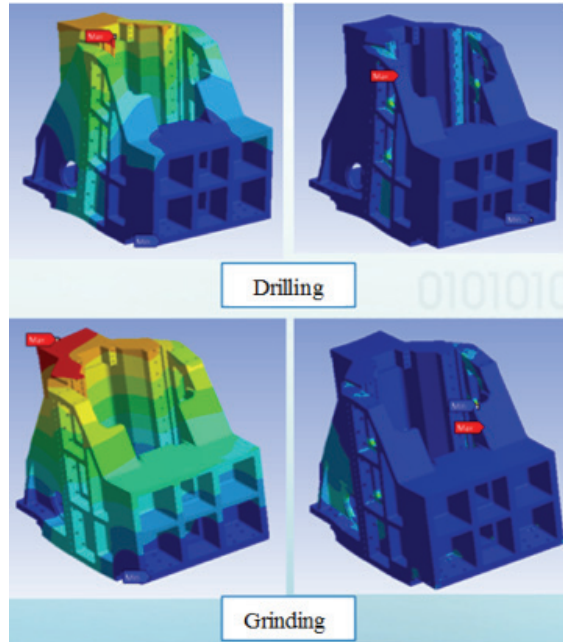


Fig. 11 Analysis of Transfer system according to work

Fig. 11은 이송계 system의 변형량과 응력을 드릴가공과 연삭가공 시 해석한 결과이다. 드릴가공시 최대변형량이 0.95  $\mu\text{m}$ 로 Main Spindle 연결부분 상단에 붉은색으로 나타났으며, 최대 응력은 1.63 MPa로 나타났다.

연삭가공시, 1.05  $\mu\text{m}$ 로 구조물 상단에 최대변형량이 붉은색으로 나타났으며, 이송계의 전면하단부에서 변형량이 가장 작게 나타났다. 응력의 경우 1.17 MPa로 측면 구조물 측에서 나타나는 것으로 해석 되었다.

### 3.4 공구교환장치

공구교환장치는 내경 및 절삭 Tool을 적용할 수 있으며, 회전 공구용 Holder를 장착하여 Mill기능이 가능하도록 설계를 하였다. One 모터 적용 설

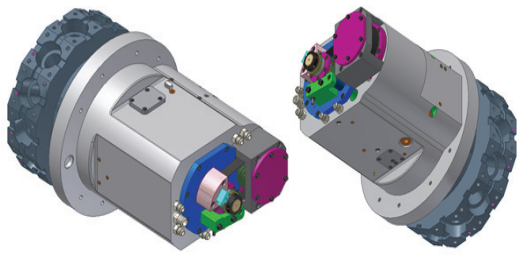


Fig. 12 3D Modeling of Vertical Grinding System Turret

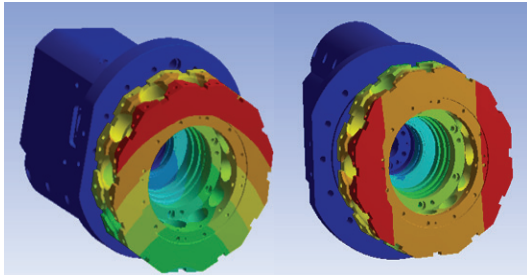


Fig. 13 Analysis of Vertical Grinding System Turret

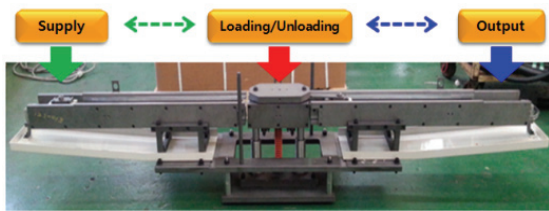


Fig. 14 The picture of pick-up station

계방식으로 Disc 회전과 Mill기능을 모터 1개로 구동이 가능하다. Mill의 최고 회전 속도는 5,000 RPM이며, Compact한 구조로 제작비가 경제적이다.

Fig. 13은 터렛의 구조해석과 모달해석의 결과를 보여주고 있다. 가공부하가 걸리는 지점에서 붉은색으로 표시되며, 최대 29.149 um의 나타났다. 1차모드에서는 453.82 Hz의 고유진동수가 나타났으며, 터렛의 양부분에 붉은색으로 변형이 나타났다.

### 3.5 픽업스테이션

주축스핀들에 제품의 공급, Loading & Unloading, 배출의 3 Station으로 구성되어 있다. Air cylinder를 이용하여 왕복운동으로 공급과 배출이 이루어진다. Loading & Unloading Station에서 제품과 척의 기준면이 평행을 이룰 수 있도록 단계별 완충이 되도록 설계하였다. Fig. 14는 픽업스테이션의 모습을 보여주고 있다.



Fig. 15 The picture of Vertical Grinding System

## 4. 결론

본 논문에서는 다기능 하이브리드 수직형 복합 연삭시스템 개발을 위하여 현재 진행되고 있는 연구에 대해서 일부 소개를 하였다. 절삭과 연삭이 하나의 장비에서 가공이 되는 이 장비는 본 논문의 해석에 대해 강성이 높은 베드의 재료를 사용하여 제작이 되었으며, 각 주요 유닛 부분에서도 구조해석과 모달해석 결과를 바탕으로 설계되어 제작이 되었다. 국내에서는 최초로 국내기술로써 개발이 되고 있으며, 현재 Fig. 15와 같이 1차적인 시스템이 완성이 되었다. 향후 현재 완성된 시스템을 이용하여 가공테스트 및 정밀도향상 테스트를 진행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업원천기술개발사업의 “차세대 하이브리드 연삭시스템 개발” 과제로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M., and Witt, S., “Virtual Machine Tool,” CIRP Annals, Vol. 54, No. 2, pp. 115-138, 2005
- Bai, B., Zhang, L., Guo, T., and Liu, C., “Analysis of Dynamic Characteristics of the Main Shaft System in a Hydro-turbine Based on ANSYS,” Procedia Engineering, Vol. 31, pp. 654-658, 2012.
- ANSYS Inc, “ANSYS Command Reference,” pp.

- 1013-1017, 2010.
4. Ohmori, H., "Electrolytic In-Process Dressing(ELID) Grinding for Ultraprecision Mirror Surface Machining," International Journal of JSPE, Vol. 26, No. 4, Paper No. 273, 1992.
  5. Ohmori, H. and Takahashi, I., "Efficient Grinding Technique Dressing for Precision Machining of Hard Materials," International Journal of JSPE, Paper No. 315, 1994.
  6. Cunningham, E. P., "Digital Filtering," Houghton Mifflin, 1992.