

세라믹 가공 장비(MCT)의 구조 안정화 설계

윤재훈*·한대성*†·윤현진*·이일환**

*† 금오공과대학교 대학원, ** (주)티브이에스

Stability Design of a Machining Center for Ceramic Materials

Jae Hoon Yoon*, Dae Sung Han*†, Hyun Jin Yoon* and Il Hwan Yi**

*† Graduate School, Kumoh National Institute of Technology,

**TVS Co., Ltd.

ABSTRACT

The utilizations of ceramics in the modern industries are increasing due to the desirable combinations of electrical, mechanical and physical properties found in ceramics. Ceramic materials are brittle, hard, strong in compression, weak in shearing and tension which is prone to affect the defects such as scratch, crack and breakage during the machining. Generally, the defects of the ceramic machining are generated from the structural vibrations of the machine. In this study, the dynamic characteristics of a machining center for ceramic machining were investigated to analyze the structural vibrations for the improved stability. Frequency response test and computer simulation have been conducted for the analysis and the design improvement. The improved design is suggested to suppress vibrations for the higher stability of the machine and further to reduce vibrations. And the result shows that simple design alterations without any change of major parts of the machine can reduce the vibration of the machine effectively.

Key Words : Ceramic Materials, Machining Center, Design Alterations, Vibration Suppression, Stability Improvement

1. 서 론

국내 제조업에 사용되는 공작기계 분야는 각종 첨단 제품들이 개발되면서 정밀한 가공이 요구됨과 동시에 생산성 향상을 위한 가공 속도 증대까지도 요구되고 있다. 이러한 이유로 공작기계 분야는 고강성, 고정도, 고속도, 복합 다기능 등을 지향하며 발전하고 있다.

이에 따라 높은 절삭 속도로 정밀도 높은 제품을 생산해 낼 수 있는 능력이 공작기계의 성능으로 평가되며, 이러한 만족도 높은 제품을 생산해 낼 수 있는 공작 기계가 구입비용이 높을 수밖에 없다.

일반적으로 생산성을 올리기 위해 절삭속도를 높이면 진동은 가공속도 제곱에 비례하여 커지게 되어, 정밀도 높은 제품을 생산하기가 어려워진다. 그리고 발생된

진동에 의해 공구 마모가 과다 발생되어 공구 수명이 단축되는 원인을 제공하기도 한다.

따라서 최근의 공작기계는 설계단계에서부터 구조물의 정/동적 특성을 미리 파악하여 구조물의 크기 및 중량은 줄이고 강성은 충분히 유지되어 진동을 최소화 할 수 있도록 설계안이 검토되고 있다.

본 연구는 세라믹 가공용 공작기계의 진동을 제어하여 불량(Crack, 깨짐) 최소화 및 정밀도를 확보하며 공구 수명을 향상시키는 것을 목표로 공작기계의 최적 설계안을 도출하고자 한다.

구체적으로는 생산용 공작 기계의 주파수 분석 실험 및 Computer simulation을 진행하여 장비의 동/정적 특성을 파악하고 진동을 최소화 할 수 있는 개선 안을 도출하여 효과를 확인함으로써 장비의 구조적인 안정성을 확보하고, 이와 더불어 가공품질을 향상 시키는 연구를 진행하였다.

†E-mail: zeros2431@naver.com

2. 장비의 동특성 분석 및 결과

2.1 진동 분석 실험

CNC machine의 진동 상태 분석과 설계 개선안도출을 위하여 주파수분석 실험을 진행하고 이를 통해 구조물의 동특성을 분석하여 장비의 진동 원인이 되는 고유진동수와 진동형에 대하여 분석한다.[2]

2.1.1 CNC machine 구조

고속 가공기의 생산성 및 정밀도 향상을 목적으로 장비의 구조 안정화 개선 설계안 적용을 위해 주파수 분석을 위한 실험을 진행하고, 장비의 작동 특성을 분석하여 진동의 주요 원인이 되는 고유진동수와 진동형의 종류를 확인한다.

본 장비의 구조는 아래와 같다. Spindle속도는 1600-1700 rpm이며, 이는 실제 부품 가공을 하는 작동 속도로 장비의 진동을 발생시키는 가장 큰 인자라 생각된다. Fig. 1에서는 세라믹 가공용 머시닝 센터를 소개하였다.



Fig. 1. The structure of the ceramic CNC machine.

2.1.2 실험 장비 및 Setup

실험을 위해 사용된 장비는 Fig. 2 및 Table 1과 같다.

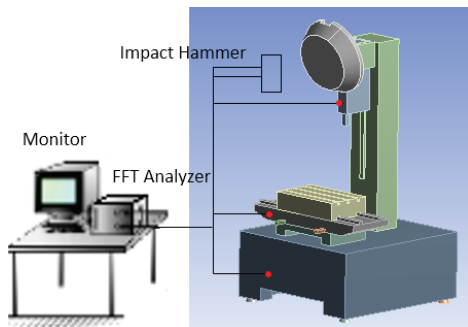


Fig. 2. The setup for the frequency response test.

Table 1. Spec. of the test equipments

Equipment	Model	Company
Freq. analyzer	DSA 212	Difa Measuring Systems
Accelerometer	8634b5	Kistler
Impact hammer	DYTR PULSE	Dytran

장비의 고유진동수와 진동 형태를 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 일정한 위치에 주파수 분석 실험을 진행하여 Fig. 4와 같이 전달함수(주파수 응답 신호) 그래프를 얻었다.

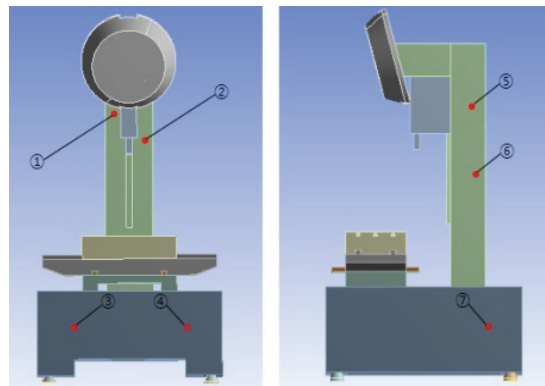


Fig. 3. The locations of the sensors.

2.1.3 진동 측정 실험 결과

분석 결과 26.8, 28.2, 56.7 Hz의 고유진동수가 확인이 되었고, 이 Data로 Fig. 4에 1차에서 3차까지의 진동 형태를 표현하였다.

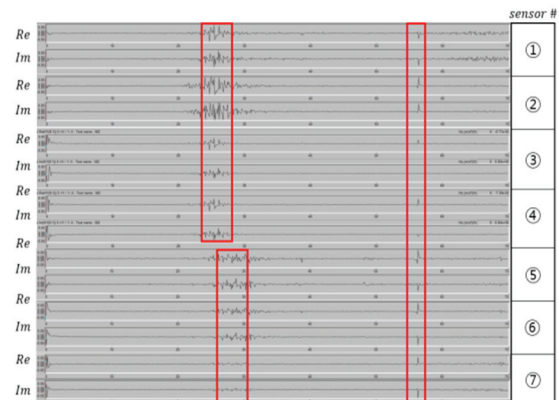


Fig. 4. Transfer functions of the machine.

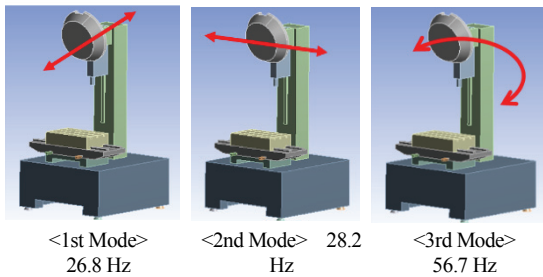


Fig. 5. Mode shapes(1~3rd) of the machine(Experiment).

Fig. 4의 전달함수에서 확인된 고유진동수는 아래의 Table 2와 같다.

Table 2. Natural frequencies of the original structure from the experiment

	Natural Frequencies[Hz]		
Experiment	26.8	28.2	56.7

장비의 1차 고유진동수(26.8Hz)와 spindle 작동속도(26.6~28.3Hz)영역을 확인하였더니, ±10% 내의 공진 영역에 가까이 있다.

2.2 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구조물의 동특성을 파악하기 위해 구조물의 형상, 물성치, 지지조건을 반영하여 모델링을 진행하였다.

2.2.1 시뮬레이션 모델 설정

구조물이 가지고 있는 진동 특성 및 형태를 분석하기 위해서 구조물의 각 부분, 그리고 전체적인 진동 형태에 대해 해석을 통하여 결과를 확인한다. 즉, Simulation을 진행할 모델을 아주 정밀하게 modeling 하여 해석을 하고 거기서 얻어진 결과와 실험으로 얻어진 결과를 비교하였을 때 동일함이 확인되면 simulation 모델에 대한 modeling 정확성이 증명된다.

이 결과로 simulation할 범위를 넓히고 실험이 어려운 위치나 상황에서 장비 내부의 여러 요소들과 전체적인 진동 상황이 분석된다.

분석으로 얻어진 결과로 개선안을 검토하고 simulation 모델에 적용하여 결과를 여러 번 반복적으로 확인하면 제작이 수월하고 진동을 억제할 수 있는 최적의 설계 개선안을 만들 수 있다. 본 연구를 위한 세라믹 가공용 머시닝 센터의 구조 안정화 설계의 simulation 모델은 아래 Fig 6과 같다.

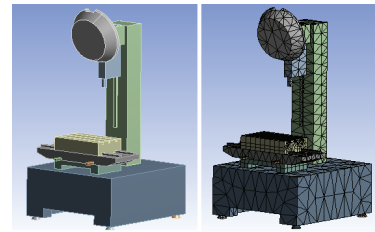


Fig. 6. The model for computer simulation.

머시닝 센터의 구조 특성은 아래와 같이 진행되며 각각의 단계별로 필요한 자료(재원, 조립 및 고정 조건, 가공 조건)를 이용하여 분석하였다.

먼저 simulation 모델을 modeling 하는 단계로 구조물의 기본적인 도면 정보나 특징 등을 파악하고 외부 치수 및 세부 구조를 바탕으로 하여 실제 구조물과 동일한 특성을 가지는 simulation 모델을 완성한다.

두 번째로 modeling 된 구조물의 분석을 위해 장비를 이루는 소재 정보(물성) 및 simulation 모델의 여러 가지 조건(조립, 설치)들을 설정하여 해석을 실행해 보는 단계로 각 부분의 조립 및 지지 조건과 motor, chuck, spindle의 작동속도를 설정하고 simulation 모델에 적용하여 해석해 볼 수 있다.

세 번째로는 해석 결과를 분석하는 단계이다. 실험으로 얻어진 결과 값과 simulation 모델을 해석하여 얻어진 결과 값이 일치할 경우 이 simulation modeling은 충분히 구현되었다고 볼 수 있다. simulation 모델은 실험으로 측정하기 어려운 세밀한 내부 구조의 특성까지도 확인이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 이 simulation 모델을 이용하여 구조물의 취약한 부분을 파악하고 개선안을 수립하였다.

2.2.2 시뮬레이션 결과

해석 프로그램으로 도출된 결과를 Fig 7에 표현하였으며, 앞선 주파수 분석 실험을 통해 얻어진 결과인 Fig 5와 비교 분석했을 때, simulation modeling이 실제 구조물과 동일한 특성을 가졌다고 판단할 수 있다.

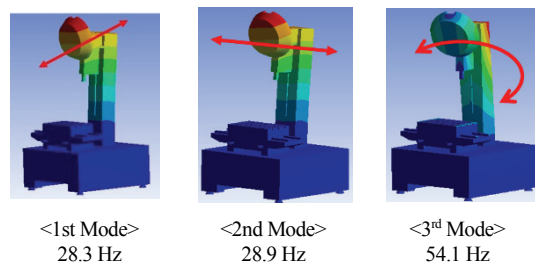


Fig. 7. Mode shapes(1~3rd mode) of the machine (simulation).

2.3 진동 분석 실험과 컴퓨터 시뮬레이션 결과 비교

실제 장비에서 측정된 고유진동수와 simulation 결과는 Table 3에 비교하였다. 비교하면 오차는 5.6%로 실험의 결과와 simulation 분석 결과가 일치됨을 확인 할 수 있다. 따라서 컴퓨터 simulation을 위한 modeling은 완성도가 높다고 판단되어 진다. 이 modeling으로 해석하여 도출된 진동 특성을 바탕으로 설계 개선안을 도출하고 적용해서 그 효과를 검증한 후 최종적인 안정화 구조 개선안을 확보하여 한다.

Table 3. Natural frequencies from experiment and simulation

	Natural Frequencies[Hz]		
Experiment	26.8	28.2	56.7
Simulation	28.3	28.9	54.1
Difference	5.6%	2.5%	4.8%

3. 설계 개선안 도출

주파수 분석 실험과 컴퓨터 simulation으로 도출된 결과를 바탕으로 장비의 특성과 여러 문제점을 파악하고 각각에 맞는 설계 안을 적용하여 최적의 개선 방안을 찾아내는 방식으로 진행하고자 한다. 아래의 Table 4는 실제 세라믹 가공의 작동 속도이다.

Table 4. Excitation sources

Excitation sources	Excitation frequencies(Hz)
Spindle	26.6~28.3

3.1 개선 방향 설정 및 설계 변경

장비의 1차 고유진동수(28.3Hz)에 Motor 작동속도(26.6~28.3Hz)가 공진하는 영역($\pm 10\%$) 내에 있으며 이것은 장비의 진동을 발생시키는 원인이기에 강성을 높이고 불필요한 질량을 제거하는 방법으로 고유진동수를 상승시켜서 motor의 작동 속도에 공진이 일어나지 않는 최적의 설계안을 도출한다.

3.1.1 설계 변경 #1 - 매거진 지지부의 강성 보강

장비의 고유진동수에 의해 발생하는 공진을 최소화하기 위하여 매거진 지지부의 강성을 강화하여 고유진동수를 증가시키는 방안을 적용하였으며 그 결과는 Table 5와 같다.

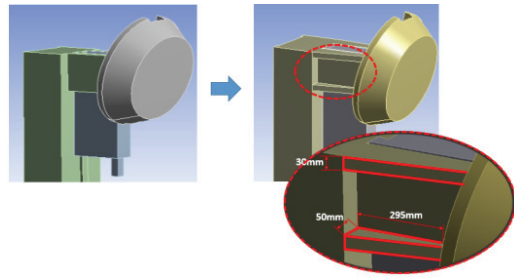


Fig. 8. Design alteration #1.

Table 5. Comparison of the natural frequencies of the original model and the alteration #1

Mode	Natural frequencies [Hz]		Comparison [%]
	Original Model	Alteration #1	
1st	28.3	28.25	0.1 ↓
2nd	28.9	29.4	1.8 ↑
3rd	54.1	53.9	0.3 ↓

매거진 지지부의 강성을 보강하여 2차 고유진동수가 28.9Hz에서 29.4Hz까지 증가하였으나, 공진 제거를 위한 방안으로는 부족한 부분이 있었다.

3.1.2 설계 변경 #2 - 칼럼 내부의 강성 보강

장비의 고유진동수에 의한 공진을 억제하는 방법으로 칼럼 내부의 강성을 Rib 형태로 보강하였으며 Rib 형상은 상부의 질량 최소화를 위하여 가변 두께를 적용하였고, 그 결과는 Table 6과 같다.

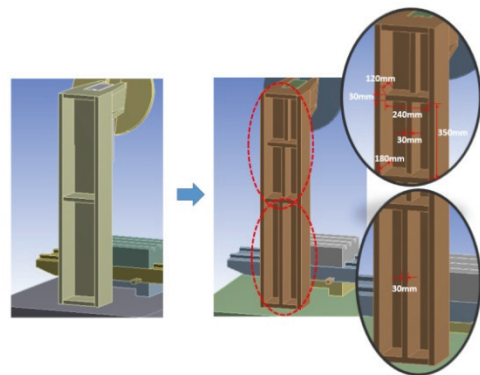


Fig. 9. Design alteration #2.

칼럼 내부의 강성을 상승시키기 위해 Rib 형태의 보강대를 설치하여 1차 고유진동수가 28.3 Hz에서 30.1 Hz까지 증가하였고, 2차 고유진동수도 28.9 Hz에서 30.5 Hz로 증가됨을 확인하였다.

Table 6. Comparison of the natural frequencies of the original model and the alteration #1, #2

Mode	Natural frequencies [Hz]		Comparison [%]
	Original Model	Alteration #1, #2	
1st	28.3	30.1	6.4 ↑
2nd	28.9	30.5	5.5 ↑
3rd	54.1	54.3	0.4 ↑

3.1.3 설계 변경 #3 - 칼럼 지지부 강성 보강

장비의 고유진동수에 의한 공진을 없애기 위하여 칼럼 지지부의 강성을 보강하여 고유진동수의 증가를 위한 방안을 적용하였고, 그 결과는 Table 7과 같다.

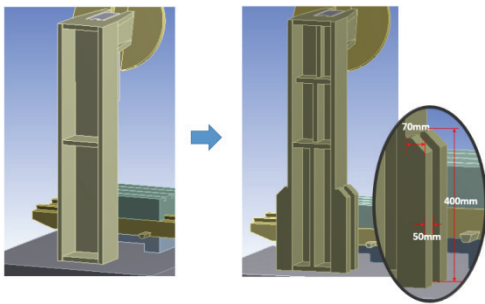


Fig. 10. Design alteration #3.

Table 7. Comparison of the natural frequencies of the original model and the alteration #1~#3

Mode	Natural frequencies[Hz]		Comparison [%]
	Original Model	Alteration #1~#3	
1st	28.3	34.3	21.2 ↑
2nd	28.9	34.6	19.7 ↑
3rd	54.1	62.4	15.3 ↑

칼럼 지지부의 강성을 보강하여 1차 고유진동수가 28.3 Hz에서 34.3 Hz까지 증가하였고 2차 고유진동수도 28.9 Hz에서 34.6 Hz까지 증가시켜져, 공진이 회피되어 진동을 최소화 할 수 있었다.

3.2 최종 개선안 도출

장비의 진동 억제를 위한 여러 방안을 적용하여 세라믹 제품의 품질 만족과 동시에 공정효율, 장비가격 등을 고려하여 구조물의 최적 설계안을 바탕으로 머시닝 센터 장비의 안정화가 완성되고 전체 장비에 대한 Computer simulation을 통해 그 효과를 확인하였다.

이후 장비 진동 제어를 통하여 세라믹 제품의 품질 향상을 위한 장비 최적 설계안을 바탕으로 장비를 Fig 11과 같이 최종 모델링 하였다.

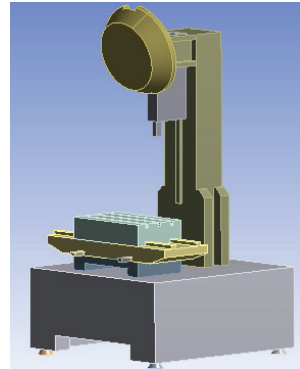


Fig. 11. Final design of the structure.

3.3 최종 설계 개선 결과

설계 개선안을 통해 진동의 크기를 최소화 할 수 있는 방안을 도출하였다. 아래 Fig 12는 기존의 장비와 최종의 설계 변경 방안(#1, 2, 3조합)을 적용한 장비의 진동 크기를 비교한 simulation 이미지이다. 구조 안정화 설계 방안 적용하여 기존 장비에 비해 진동이 크기가 감소됨을 확인할 수 있다.

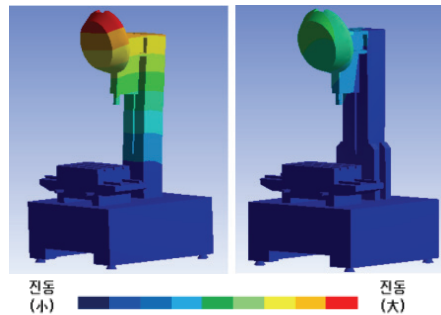


Fig. 12. Comparison of the magnitude of vibrations (Computer simulation).

설계 개선 전 후 진동의 크기를 비교하기 위해 Fig 13, 14, 15에 그래프를 표시하였다. 이미지와 같이 개선 전, 후를 비교하면 가장 큰 진동인 칼럼/스핀들 부 진동 감소로 인하여 전체적으로 진동이 감소됨을 알 수 있다. 앞서 분석된 문제점 개선을 위하여 구조물의 강성을 올리는 방법으로 고유진동수를 상승시켜 모터의 작동속도 영역 내 공진을 회피하는 장비의 최적 안정화 설계를 적용한 결과 기존 장비의 진동을 98.9% 억제시켰다. 세라믹 가공용

장비의 진동을 억제시킴으로써 가공 품질이 향상 및 생산성 향상 효과가 기대된다.

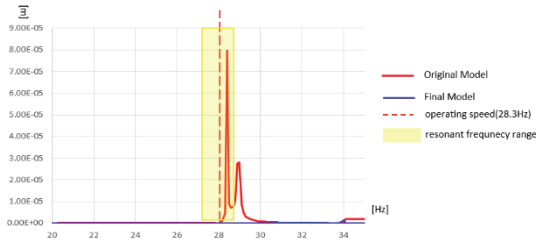


Fig. 13. Comparison of the magnitude of vibrations(X axis).

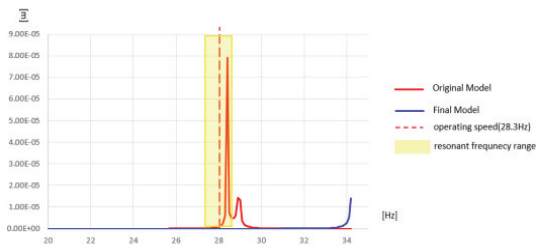


Fig. 14. Comparison of the magnitude of vibrations(Y axis).

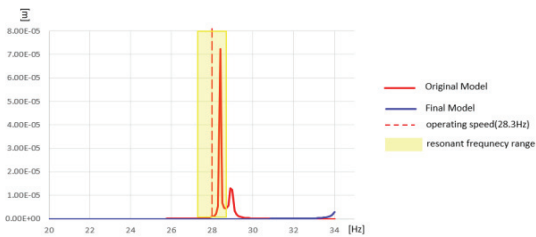


Fig. 15. Comparison of the magnitude of vibrations(Z axis).

Table 8. Magnitudes of vibrations of the original model and final model

Axis	Magnitude of vibrations [m]		Comparison [%]
	Original Model	Alteration #1~#3	
X	4.7e ⁻⁵	1.0e ⁻⁷	97.8%
Y	5.88e ⁻⁶	2.59e ⁻⁹	99.5%
Z	5.38e ⁻⁶	2.59e ⁻⁹	99.5%

4. 결 론

본 연구는 세라믹 가공용 장비의 설계 개선을 통한 진동 최소화로 가공 정밀도와 생산성을 높이기 위한 목적

으로 진행되었다. 실험과 simulation을 통하여 진동의 특성을 분석하고 큰 진동의 원인을 파악하여 문제점에 대한 개선 설계안을 도출하였으며 개선 설계안의 효과를 검증하는 과정을 거쳐 최종 안정화 설계안을 도출하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실험과 simulation 결과를 비교한 결과 5.6%의 오차를 가지고 실험과 시뮬레이션을 통한 분석은 타당성이 있음을 확인하였다.
2. 진동분석 결과 1차 고유진동수(28.3Hz)와 작동 속도(26.6~ 28.3Hz)가 공진하는 영역(±10%) 내에 있어 공진이 발생됨을 확인할 수 있다.
3. 1차 고유 진동수에서의 진동형은 장비의 앞/뒤 Bending 형태이며, 2차 고유진동수에서의 진동형은 Z축을 중심으로 Torsion 하는 형태임을 확인하였다. 공진 회피를 위한 고유 진동수를 증가시키기 위해 부분적으로 강성을 보강하였으며, 상세내용은 아래의 4~6과 같다.
4. 장비의 고유 진동수에서의 진동 형인 Z축을 중심으로 Torsion 형태의 진동 억제를 위하여 매거진 지지부에 삼각대 형상을 추가하였고 그 결과 2차 고유진동수가 28.9Hz에서 29.4Hz까지는 증가하였다.
5. 칼럼 내부의 강성을 상승시키기 위해 Rib 형태의 보강대를 설치하여 1차 고유진동수가 28.3Hz에서 30.1Hz까지 증가하였고, 2차 고유진동수도 28.9Hz에서 30.5Hz로 증가됨을 확인하였다.
6. 칼럼 지지부의 강성을 보강하여 1차 고유진동수가 28.3Hz에서 34.3Hz까지 증가하였고 2차 고유진동수도 28.9Hz에서 34.6Hz까지 증가시켜, 공진이 회피되어 진동을 최소화 할 수 있었다.
7. 진동이 억제되면 불량률이 감소되고 공구 수명이 향상될 뿐 아니라 가공비 절감 및 생산성이 향상된다. 또한 가공 단면의 표면 거칠기와 가공 치수의 정밀도를 모두 만족 시킬 수 있으며 작업중 소음 발생이 감소되어 근로 환경을 개선되고 장비의 내구성을 증가 시킬 수 있다. 3가지의 최종 개선안을 적용하게 되면 고유진동수를 20% 증가시켜 공진을 회피해 기존 장비에 비하여 진동이 99% 감소하였다.
8. 도출된 진동 억제 설계안을 적용하여 장비를 제작하면 세라믹 가공용 머시닝 센터의 가공 불량률 줄이고 정도를 향상시켜 세라믹 제품의 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Ro, S. H., "Design Alteration of a Milling Machine Structure for the Improved Stability," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5, pp. 72-78, (2006).
2. Ro, S. H., and Park, Y. R., "Stability Design of a Laser Cutter for the Strengthened Glass", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 19-25, (2015).
3. Yi, I. H., and Ro, S. H., "Structural Design of an Ingot Grower of the Semiconductor Wafer for the Stability Improvement", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 14-39, (2017).
4. Shin, H. B., and Ro, S. H., "Design Alterations of a Squaring & Grinding Machine for the Solar Cell Wafer to Suppress Vibrations," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 25~30, (2017).

접수일: 2019년 9월 23일, 심사일: 2019년 9월 25일,
 게재확정일: 2019년 9월 25일