

정밀회전체의 언밸런스 변화에 따른 진동과 Al6061 알루미늄 합금 가공에 미치는 영향

김민수*, 김정태*, 박석우*, 정동욱*, 최선호*, 구본흔*, 윤상환*[#]

*창원대학교 대학원 첨단방위공학

Effect of Unbalance on Vibration and Machining of Al6061 Aluminum Alloy in Precision Rotator

Min Soo Kim*, Jung Tae Kim*, Seok Woo Park*, Dong Uk Jeong*, Sun Ho Choi*, Bon Heun Koo*, Sang Hwan Yoon*[#]

*Graduate School of Advanced Defense Engineering, Changwon National University

(Received 09 November 2020; received in revised form 04 December 2020; accepted 12 December 2020)

ABSTRACT

At present, with the development of precision instruments, high dimensional accuracy of workpieces must be ensured. In particular, for the aluminum alloys used in automobiles, the surface roughness of the workpiece is extremely important. The dimensional accuracy and surface roughness of the workpiece is considerably affected by the rotational accuracy of the rotor. Therefore, to enhance the rotational accuracy, various variables such as those related to the components such as bearings, motors, and end mills, rotational speeds, and vibrations must be considered. In this study, the difference in the quality of the workpieces was compared considering the weight imbalance and rotational speed as variables.

Key Words : Precision Rotor(정밀 회전체), Unbalance(불균형), Vibration(진동), Surface Roughness(표면거칠기)

1. 서 론

최근 신성장 산업인 경량 소재 산업과 함께 경량 소재의 정밀가공 기술이 주목 받고 있다. 특히 운송기기의 연비향상과 스마트기기 등 첨단산업 제품의 경량화 요구에 따라 가벼우면서도 우수한 기계적 성질을 보유하고 있는 알루미늄 합금 소재가 가장 주목되고 있다. 알루미늄 합금을 첨단제품의 부품으로 사용하기 위해서는 고정밀의 가공 품질이 요구되며, 이는 공작기계의 가공 정밀도와 밀접한 관계가 있다. 가공 정밀도는 주축 회전체의 회전

정밀도에 크게 영향을 받게 되는데 주축 회전체의 회전정밀도에 영향을 주는 인자중 언밸런스량(Unbalance mass)은 진동을 유발하고 공작물의 형상 오차와 표면거칠기에 영향을 주게된다.^[1-2]

본 연구에서는 주축 회전체의 언밸런스량을 변수로 하여 언밸런스량과 회전속도의 변화에 따른 공작기계의 진동 특성과 알루미늄 합금 표면 거칠기의 상관관계를 실험적으로 고찰하여 보았다.

2. 이론적 배경

2.1 언밸런스

회전체에서 발생하는 언밸런스의 원인으로서는 소

Corresponding Author : cluster5@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-2892, Fax: +82-55-213-2900

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

재의 밀도 불균일, 비대칭 형상, 조립 공차, 부식, 이물질 부착 등이 있다.

일반적으로 회전시스템의 언밸런스량은 불가피하게 존재하게 되며 이는 Fig. 1 및 식 (1)과 같은 속도의 제곱에 비례하는 원심력을 발생시키게 된다. Fig. 1과 식 (2)에 따라 언밸런스의 단위는 gmm로 나타낸다³⁻⁴⁾.

$$F = m \times r \times \omega^2 \quad (1)$$

$$U = m \times r \quad (2)$$

여기서 F 는 원심력, m 은 언밸런스량, ω 는 각속도, r 은 회전중심에서 언밸런스까지 거리이다.

2.2 진동

진동이란 넓은 의미로는 속도, 온도, 압력 등의 수치가 시간에 따라서 기준치보다 커지거나 작아지는 현상을 말하는 것이다. 본 연구에서는 언밸런스량 변화에 따라 주축 회전체가 떨리는 현상을 진동으로 나타내었다.

진동계(Vibration system)란 Fig. 2에서 보는 바와 같이 입력이 동적인 힘 즉, 가진력이고 출력이 진동 즉 변위나 속도, 가속도로 나타나는 시스템을 말하며 어떠한 진동계든지 공진현상이 발생하게 된다⁵⁾. 공진계의 고유 진동수와 가진 주파수가 일치할 경우 발생하게 되는 공진현상은 공진주파수 영역 부근에서 응답이 증폭되어 진동진폭이 증가하게 된다. 피삭재 가공에 있어서 이러한 공진현상은 매우 위험하며 반드시 회피해야만 한다⁶⁻⁷⁾. 회전계에서 진동의 원인은 매우 다양하며 가장 대표적인 원인으로서는 앞서 설명한 언밸런스가 있다. 진동의 단위는 mm/s이며 식 (3)을 따른다.

$$u_c = \sqrt{(u_a^2 + u_{b1}^2 + u_{i2}^2)} \quad (3)$$

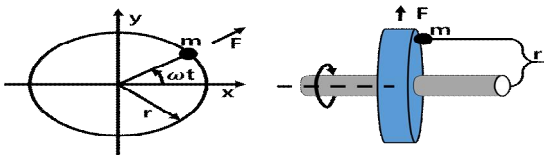


Fig. 1 Schematic diagram of mass unbalance in static unbalance force

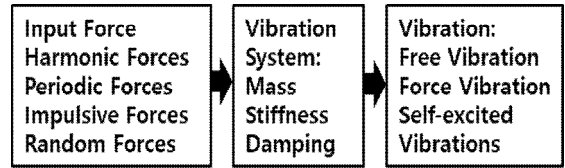


Fig. 2 System indicating vibration

2.3 상향절삭 및 하향절삭

피삭재를 가공할 때 가공 방향에 따라 결과물의 정밀도가 달라진다. 절삭은 가공물의 이송 방향과 커터의 회전 방향이 반대로 움직이며 절삭하는 상향절삭과 가공물의 이송 방향과 커터의 회전 방향이 같은 방향으로 움직이는 하향절삭이 있다⁸⁾.

상향절삭은 절삭과정에서 칩의 두께가 증가하고 인서트와 가공물 사이의 열과 응력이 발생하며 칩 배출시 인서트에 충격이 있다. 반면 하향절삭은 인서트가 깊게 들어가서 칩의 두께가 점점 얇아지며 절삭이 이루어지며 열과 압력의 부하증가를 방지한다는 특징이 있다.

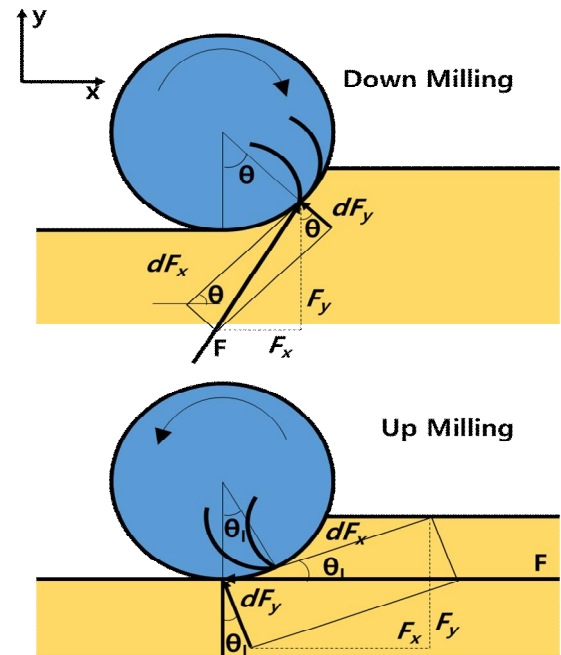


Fig. 3 Mechanical comparison of up milling and down milling

회전 방향이 바뀌에 따라 날에 작용하는 접선 방향 절삭력은 공구의 회전과 반대 방향으로 엔드밀에 작용한다.

엔드밀에 존재하는 헬릭스 각에 의하여 미소 절삭 날의 각 위치 θ 가 축을 따라 변화하므로, 모든 미소 절삭력을 공구 방향과 법선 방향에 대하여 고정된 x, y좌표계를 기본으로 좌표 변환하여 모두 합하면, 하향절삭에 대하여 다음과 같은 형태의 계산식인 식 (4), 식 (5)를 유도할 수 있다.

$$F_x = \sum(dF_l \times \cos\theta - dF_r \times \sin\theta) \quad (4)$$

$$F_y = \sum(dF_l \times \sin\theta + dF_r \times \cos\theta) \quad (5)$$

동일한 방법으로, 상향절삭 시의 절삭력을 계산하기 위하여 다음과 같은 식 (6), 식 (7)을 이용하였다.

$$F_x = \sum(-dF_l \times \cos\theta - dF_r \times \sin\theta) \quad (6)$$

$$F_y = \sum(-dF_l \times \sin\theta + dF_r \times \cos\theta) \quad (7)$$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 CNC 머시닝센터는 연구목적으로 제작한 3축 가공방식의 Fig. 4와 같은 장비이며, 3축의 스토르크(Stroke)는 Table 1에 나타내었다.

주축 회전체에 사용된 모터는 최대 24,000 RPM의 회전수를 가진 일본 M사 스핀들 모터(SJ-VL15-25FZT)이며, 모터쪽 앵글러 볼 베어링(7209C,P5) 2개와 공구 쪽 테이퍼 롤러 베어링(32210J,P5) 2개를 각각 배면 조합으로 Fig. 5와 같이 구성되어 있으며, 주요제원은 Table 2에 나타내었다.

절삭공구는 알루미늄 합금을 가공하기 위해 와이 지원(YG-1)사 초경 3날 스퀘어 엔드밀(ALU-CUT, E5D70080*)을 사용하였으며 형상 및 제원은 Fig. 6과 Table 3과 같다.

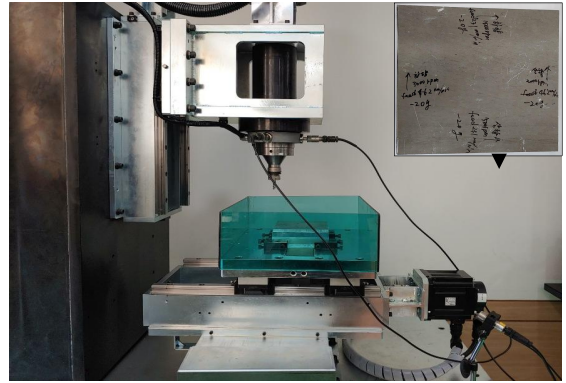


Fig. 4 CNC machine tools and vibration measurement equipment and test pieces

Table 1 CNC machine tools

X axis Stroke (Max feed)	150(490)mm
Y axis Stroke (Max feed)	150(490)mm
Z axis Stroke (Max feed)	150(200)mm
Controller	MITSHBISH M700
X axis Motor	HF154S
Y axis Motor	HF154S
Z axis Motor	HF224BS-A48

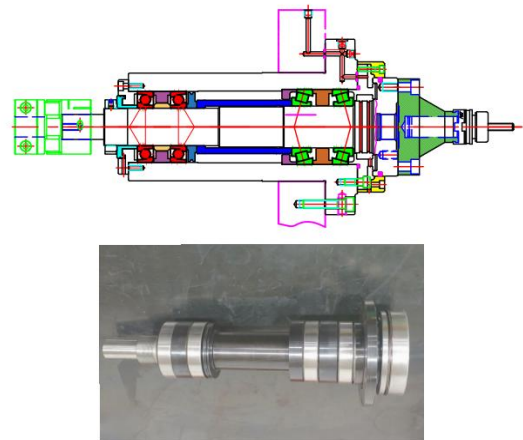


Fig. 5 Drawing of spindle and bearing arrangement

Table 2 Spindle specification

TAPER ROLLER BEARING	FAG 32210J (2EA)
ANGULAR BEARING	FAG 7209C P5 (2EA)
O-RING	NOK G-90
LOCK NUT	DURI ZM-45 LEFT
LAMINAR RINGS	FEY FK6-ASD- \varnothing 118(1.96T)
COUPLING	DURI DJC-65CRD \varnothing 30 \times \varnothing 24
TOOL HOLDER	NT-TOOL KH-25A

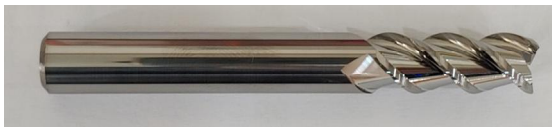


Fig. 6 Shape of end mill with 3-flute used in the study

Table 3 Dimensions of end mill in the Study

Diameter	Flute	Tool material	Helix	Coating
8mm	3	HSS	45°	×

3.2 가공 시편

본 연구에 사용한 소재는 범용 알루미늄 합금인 Al6061를 열처리하여 인장강도와 항복강도를 높인 Al6061-T6를 150 x 150 x 50 mm로 일정하게 가공된 시편을 사용하였다. 시편의 화학적 성분 및 기계적 특성은 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Chemical compositions of Al alloy 6061-T6(wt%)

Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Cr
REM	0.15 ~0.40	0.08 ~1.20	0.40 ~0.80	0~ 0.70	0~ 0.15	0~ 0.25	0~ 0.15	0.04 ~0.35

Table 5 Mechanical compositions of Al alloy 6061-T6

Tensile Strength (Mpa)	245
Yield strength (Mpa)	295
Elongation (%)	10

3.3 진동 측정 방법

주축 회전체의 진동을 측정하기 위한 장비는 체코 Adash 사의 Adash 4300 VA3PRO를 사용하였으며 이 장비는 분석기 본체와 2개의 마그네틱 센서, 1개의 레이저 센서로 구성되어 있다. 본 실험에서는 진동의 정확한 측정을 위해 스피들의 X축 방향과 Y축 방향에 마그네틱 센서를 부착 하였다.

회전체의 언밸런스량은 0g에서 20g까지 5g간격으로 각각 1500rpm, 3000rpm, 4500rpm으로 회전시켜 진동은 측정하였다. 진동 값은 IS 규격에 따라 mm/s 단위를 적용하였으며 유효 파형을 의미하는 RMS(Root Mean Square) 값을 사용하였다.

3.4 가공 및 표면 거칠기 측정

본 실험에서는 Al6061 알루미늄 합금에 대하여 상향절삭과 하향절삭 가공을 각각 진행하였다.

회전수와 공구 이송속도는 해당 엔드밀에 대한 최적의 절삭조건정보를 제공받아 진행하였으며, 회전체의 언밸런스량은 0g에서 20g까지 5g간격으로 상향절삭과 하향절삭을 진행하였다. 이때 Side Cutting의 절삭 깊이는 8 mm, 절입량은 1 mm로 가공하였다.

절삭가공이 완료된 시편에 대하여 Table 6과 같은 표면조도 검출기를 이용하여 절삭면에 수직인 방향으로, Fig. 7과 같이 표면을 이동하면서 스캐닝하여 가공면의 표면거칠기 Rmax를 측정하였다. 적용되는 컷오프(Cut-off) 파장은 0.8 mm씩 6번을 적용하였고 정확한 측정치를 위해 첫 컷오프 자료는 필터 하였다.

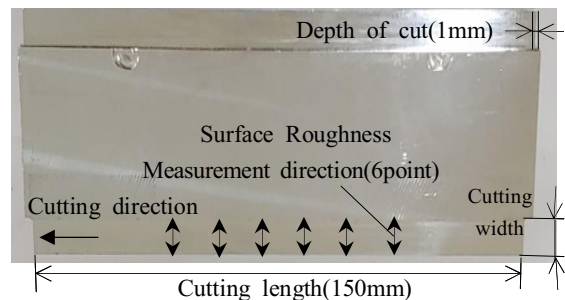


Fig. 7 Surface roughness measurement of aluminum test piece

Table 6 Surface roughness tester

Model Name	KOSAKA SE-3500K
Standards	JIS(2001/94/82), DIN, ISO, etc
Measuring range	Z: 600 μm X: 100 mm
Measuring magnification	Z: 50-500,000 X: 1-5,000
Recording	Recordable in free layout

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 진동 특성

주축 회전체의 언밸런스량을 0g에서 20g까지 5g 간격으로 변화시키면서 주축 회전체의 회전속도를 1500rpm, 3000rpm, 4500rpm으로 각각 변화시켰을 때 스핀들의 X축 방향과 Y축 방향의 언밸런스량에 따른 진동 값은 Table 7과 같이 나타났다.

한편 X축과 Y축 각 방향의 언밸런스량과 회전 속도에 따른 진동경향을 Fig. 8과 같이 확인 할 수 있었다.

경향 그래프에서 확인 할 수 있듯이 X축 방향에서는 언밸런스량이 커짐에 따라 진동 값이 4500 rpm에서 0.711mm/s, RMS로 가장 높은 값을 보였으나 전반적으로 1mm/s, RMS 이내의 값으로 진동의 변화가 미미하였다. 반면 Y축 방향에서는 언밸런스량이 커짐에 따라 3000rpm 및 4500rpm에서 진동의 변화 폭이 커짐을 확인할 수 있었으며, 언밸런스량 20g에서 3000rpm은 1.549mm/s, RMS, 4500rpm에서는 4.445 mm/s, RMS 값을 보였다. 한편 Fig. 9에서는 각 회전 속도에서 X축 방향과 Y축 방향의 언밸런스량 변화에 따른 진동 변화를 비교하여 나타내었다.

Table 7 Vibration measurement(mm/s, RMS)

	1500 rpm-x	1500 rpm-y	3000 rpm-x	3000 rpm-y	4500 rpm-x	4500 rpm-y
Base	0.050	0.050	0.127	0.355	0.711	0.609
5 g	0.050	0.050	0.177	0.279	0.431	0.381
10 g	0.050	0.050	0.203	0.812	0.457	0.787
15 g	0.050	0.050	0.228	1.371	0.533	1.549
20 g	0.076	0.076	0.304	1.549	0.889	4.445

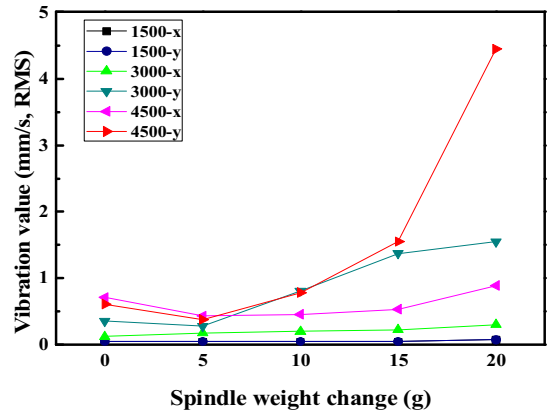


Fig. 8 Vibration measurement graph according to unbalanced mass

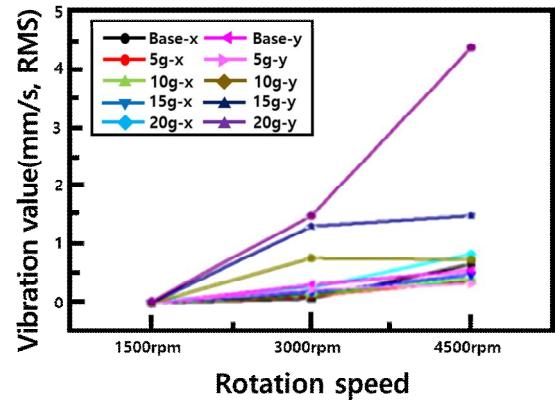


Fig. 9 Vibration measurement graph according to rotation speed

1500rpm의 경우 언밸런스량에 따른 X축 방향과 Y축 방향에서 진동 값 차이가 없었으며, 3000rpm과 4500rpm에서는 언밸런스량이 증가할수록 X축 방향 대비 Y축 방향의 진동 값의 증가가 뚜렷한 것을 확인할 수 있었다.

4.2 표면 거칠기

각 회전속도에서 언밸런스량 변화에 따른 알루미늄 합금을 하향절삭 가공면의 표면 거칠기를 측정 한 값은 Table9와 같이 나타났으며 Fig.10과 같은 경향을 보였다.

한편 상향절삭의 경우 Fig. 11과 같이 절삭가공면의 표면에 무수한 칩들이 붙어있는 것을 알 수 있다. 진동은 절단면의 윤곽을 매끄럽지 못하게 한다. 칩들의 형태는 두껍고 강하며, 쉽게 끊어지지 않는다. 이로 인해 공구와 가공물 사이 경사면의 마찰도 심해지며 칩이 더욱 응착하며, 표면 거칠기에도 많은 영향을 끼친 것으로 판단된다.

또한 하향절삭 시 회전속도가 빠를수록 표면 거칠기가 양호해짐을 확인할 수 있다. 반면 회전속도 별 무게 변화에 따른 표면 거칠기는 1500 rpm에서는 20g보다 10g에서 더 표면의 거칠기가 0.01mm 정도 더 거칠게 측정됐다. 반면 4500rpm에서는 10g에서의 표면 거칠기는 20g에서보다 0.02 mm 정도 거칠기가 양호한 것을 확인할 수 있다. 이는 재현성 실험을 진행한 결과도 유사한 경향을 보이는 것으로 보아, 본 연구에서 사용한 회전체 자체의 진동 특성이 10g에서 영향을 받기 때문으로 판단된다. Fig. 13에서의 거칠기 이외의 결과 값들은 무게 변화가 커질수록 표면 거칠기가 거칠어지는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 11 Surface photo of the cutting surface after upward cutting

5. 결론

본 연구는 여러 가지 가공 장비 중 최근 가장 널리 쓰이고 있는 CNC 머시닝센터의 스핀들 정밀회전체의 언밸런스 양의 변화에 따른 진동 특성과 스핀들 정밀회전체의 회전속도가 Al6061-T6 알루미늄 합금 가공 시 표면 거칠기에 미치는 영향을 연구하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

Table 9 Surface roughness measurement

	1500 rpm	3000 rpm	4500 rpm
Base	0.087	0.060	0.070
5 g	0.080	0.077	0.070
10 g	0.107	0.077	0.063
15 g	0.083	0.077	0.067
20 g	0.097	0.097	0.083

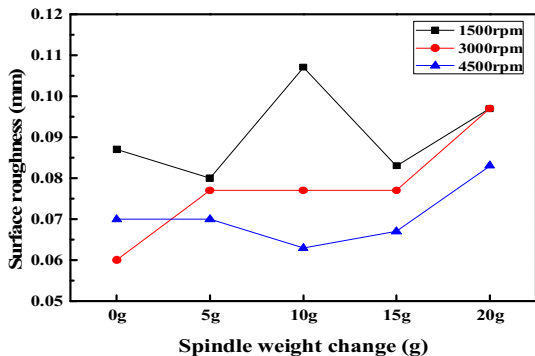


Fig. 10 Surface roughness graph

- 스핀들 정밀회전체의 언밸런스 양이 증가함에 따라 진동이 심해지는 것을 확인했으며 동일한 속도라도 측정 센서의 위치에 따라 X축과 Y축의 진동 값이 다르게 나타나는 것을 확인했다. 따라서 진동측정은 2축 이상의 센서 위치에서 진동을 확인해야 보다 정확한 진동 결과 값을 확인할 수 있을 것이다.
- Al6061-T6 알루미늄 합금 가공시 언밸런스를 최소화하고, 높은 회전속도를 이용하여 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 또한, 공구 날부에 발생하는 고온의 열과 이로 인한 공구 마모, 칩과 공구면 사이의 마찰이 거칠기에 큰 영향을 미친 것 같다^[9]. 이를 해결하기 위해 피삭재 보다 4배 이상 큰 경도를 가진 공구를 사용하거나, 인성이 크고 내산화성 및 내확산성과 같은 화학적 안정성이 큰 공구 사용을 권장한다.
- 추가적으로 경사각과 근접각 수정, 칩브레이크(Chip Break)와 말림기구(Cluler), 절삭유를 이용하여 거칠기에 미치는 인자들을 제거할 필요가 있다.

후 기

“이 논문은 창원시의 창원대학교 일반대학원 방위
산업공학전공 지원사업으로 수행되었음.”

REFERENCES

1. Kim, S. H., Kim, B. H., Jin, Y. G., “A Study on the Rotation Accuracy According to Unbalance Variation of High Precision Spindle Unit for Machine Tool”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 174-181, 2012.
2. Hong, D. K., Kim, D. Y., Ahn, C. W., “The Study on the Optimal Working Condition for Vibration Surface Roughness and Cutting Temperature in End-milling”, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 1322-1329, 2004.
3. Kim, T. J., Koo, J. H., Lee, S. B., Kim, M. S., “A Study on Balancing of High-speed Spindle of CNC Automatic Lathe”, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 1214-1221, 2009.
4. Son, D. S., Kim, S. H., Park, I. H., “A Study on the Machining Accuracy according to Vibration and Unbalance Decrease in Rotational Speed Domains of High Precision Machine Tools”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 120-125, 2013.
5. Jang, S. M., Lee, S. I., “A Study on the Vibration Parameters for High Speed Face Milling Machining”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 9, pp. 4149-4155, 2013.
6. Kim, S. G., “Research on Effect of Cutter wear on the Torsional Vibration of Spindle in Milling”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 9, 1999.
7. Park, K. B., Chung, W. J., Lee, C. M., “A Study on Roughness Characteristic about Rotational Accuracy Variation”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 18, No. 1, pp. 110-111, 2009.
8. Lee, S. K., Ko, S. L., “Improvement of the Accuracy in Machining Deep Pocket by Up Milling”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 4, 1999.
9. Lee, G. I., Kim, J. Y., “A Study on Heat Generation and Machining Accuracy According to Material of Ultra-precision Machinin”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 1, pp. 63-68, 2018.