

롤러베어링 구조형 주축 회전체의 언밸런스 변동과 절삭표면상태 연관성에 관한 연구

하정웅*, 박동희*, 박황기*, 전승민*, 홍진표*, 윤상환*, 박종규*[#]

*창원대학교 대학원 첨단방위공학

Correlation between Unbalance Variation and Cutting Surface Condition of Roller Bearing-Structured Main Spindles

Jeong-ung Ha*, Dong-hui Park*, Hwang-gi Park*, Seung-min Jeon*, Jin-pyo Hong*,
Sang-hwan Yoon* and Jong-kyu Park*[#]

*Graduate School of Advanced Defense Engineering, Changwon National University

(Received 24 June 2020; received in revised form 28 July 2020; accepted 28 July 2020)

ABSTRACT

The rotation accuracy of the main spindle that determines the accuracy of CNC machine tools is closely related to the quality of production because it directly affects the shape error and surface roughness of the workpiece. Therefore, the main spindle requires high rotation accuracy, rigidity, and rotation technology. This rotation accuracy is greatly affected by the bearing, center alignment between rotating parts, assembly tolerance, and unbalance of the rotation mass. In this study, the effects of the unbalance of the rotation mass of the main spindle on the rotation accuracy were investigated experimentally. In particular, we tried to study the technical reasons for improving the unbalance of the main spindle and maintaining the rotation accuracy as we verified the correlation between the vibration characteristics of CNC machine tools due to the specifically set unbalance amount and the surface roughness of the workpiece.

Key Words : Main Spindle(주축 회전체), Rotation Accuracy(회전정밀도), CNC Machine Tools(수치제어 공작 기계), Unbalance(불균형), Surface Roughness(표면 거칠기), Vibration(진동)

1. 서 론

주축 회전체를 기반으로 하는 공작 기계는 항공기, 자동차, 선박 등 광범위한 산업 분야에서 사용하고 있으며, 특히 로봇 및 IT 산업과 같은 첨단 산업 분야에서는 고정밀의 가공 품질이 요구되는 관

계로 공작 기계의 정밀도 유지가 대단히 중요하다. 한편 공작 기계의 정밀도는 주축 회전체의 회전정밀도와 밀접한 관계가 있으며, 이는 공작 기계의 정밀도를 결정 짓는 중요한 요소이다. 또한, 주축 회전체의 회전정밀도는 공작물의 형상 오차 및 표면 거칠기에 직접 영향을 주기 때문에 회전정밀도 유지, 향상 기술들이 지속해서 연구발전 되고 있다.

본 연구에서는 주축 회전체의 회전 질량 불균형, 즉 언밸런스량의 크기가 회전정밀도에 미치는 영향

Corresponding Author : chong@changwon.ac.kr

Tel: 055-213-3605 Fax: 055-213-2979

을 실험적으로 고찰하고자 하였으며, 특히 본 실험 결과로서 임의로 설정한 언밸런스량에 따른 동작 기계의 진동 특성과 공작물의 절삭표면의 상태 특히 표면 조도와외 상관관계를 확인함으로써 주축 회전체의 언밸런스를 향상하고 회전정밀도를 유지해야 하는 기술적 연관성을 연구하고자 하였다.

2. 언밸런스 변동에 따른 진동과 표면 거칠기

2.1 회전체의 정밀도

회전체의 정밀도는 회전 운동 시 발생하는 5자유도 운동(5 DOF motion : 5 Degree of freedom motion)에 기인한 오차의 크기와 직접적인 관계가 있다¹⁾.

5자유도 운동(5 DOF motion)오차는 회전축 방향을 Z축으로 가정했을 때, 축 방향 직선운동에 기인한 축 방향 운동 오차(δz , Axial motion error), 수직 한 2개의 축에 대한 x, y 방향 흔들림 오차인 반경 방향 운동 오차(δx & δy , Radial motion error) 그리고 회전 중 기울어지는 오차인 틸팅 운동 오차(Θx & Θy , Tilting motion error)로 정의되며 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

이와 같은 주축 회전체의 5자유도 운동 오차의 발생 원인으로는 베어링의 진원도 오차, 회전부품 간의 중심정렬(Alignment) 오차, 조립 공차, 회전 질량 불균형(Unbalance)에 기인한 오차 등이 있다.

본 연구에서는 이러한 회전체의 정밀도와 관계있는 원인 중 회전 질량 불균형(Unbalance)의 정도에 따른 진동량과 절삭가공 면의 거칠기의 상관관계에 대하여 알아보하고자 하였다.

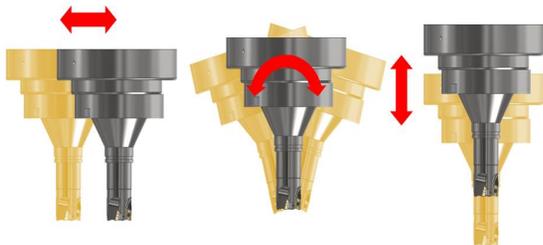


Fig. 1 5 DOF motion error

2.2 언밸런스의 이론적 분석

회전 질량 불균형 즉 언밸런스란 회전체의 회전 중심선에 대한 회전체 중량의 불균일한 분포상태를 의미한다. ISO에서는 "원심력에 의해 진동력이 베어링에 전달될 때 회전체에 존재하는 어떤 상태"라고 정의하고 있으며, 언밸런스 상태가 회전체 내에 존재할 수 있는 대표적인 원인은 여러 편의 선행연구 사례 들을 통해 확인할 수 있었다⁴⁾.

첫째 주조 과정에서 Blow Hole이나 Sand Trap이 생길 수 있으며, 이는 맨눈 검사에서 확인 어렵고 Blow Hole의 크기에 따라 매우 심한 불균형이 발생할 수 있다. 둘째 편심에 의한 불균형이다. 편심은 회전부품의 기하학적 중심선이 회전 중심선과 일치하지 않을 때 존재한다. 회전체 자체는 완전히 원형이지만 어떤 이유로 회전 중심이 중심에서 벗어나 있을 경우가 이에 해당한다. 셋째 회전체의 비틀림이다. 회전체가 정상으로 잘 밸런싱 된 것 일 지라도 비틀리거나 초기의 밸런스상태를 유지할 수 없는 물리적인 변화가 생겼을 때 발생 되는 현상이다. 대표적으로 잔류응력과 열 변형이 있을 수 있다. 넷째 비대칭 형상이다. 회전체들의 제작에서 단조물의 거친 표면, 주조시의 코어 이동 등에 의한 원인이다. 이러한 대표적인 회전체의 언밸런스 원인 외에도 Key 및 Keyway, 간극공차, 부식과 마멸 등의 예가 있을 수 있다.

언밸런스로 인한 힘은 회전속도와 불평형 양에 따라 다르며 Fig. 2와 같이 회전체의 회전 중심선으로부터 반경(r)에 위치한 언밸런스량을 가지고 있을 때 언밸런스 무게와 반경 및 회전속도를 알고 있다

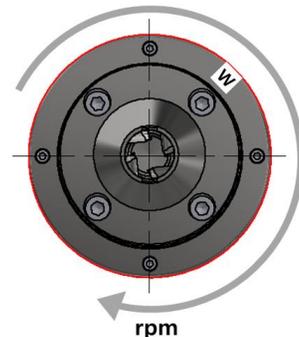


Fig. 2 Unbalance weight & force

면 언밸런스로 인해 발생한 힘(원심력, F)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 알 수 있는 것은 언밸런스에 의한 힘은 속도의 제곱에 비례하므로 고속의 주축 회전체에서는 작은 언밸런스 상태 일지라도 상당히 큰 언밸런스 원심력과 진동이 유발될 수 있다는 것이다.

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{\omega}{g} \cdot r \cdot w^2 \\
 &= \frac{\omega \cdot r}{g} \left(\frac{2\pi N}{60} \right)^2 \\
 &= 0.01 \left(\frac{N}{1000} \right)^2 \cdot \omega \cdot r
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서

F = 원심력

ω = 각속도 = $\frac{2\pi N}{60}$

r = Weight 위치의 반경

w = Unbalance Weight

g = 중력 가속도

N = 회전수 (rpm)

2.3 엔드밀의 상향과 하향절삭

엔드밀이 공작물을 절삭할 때 공작물은 소성 변형하여 칩이 발생한다. 이때 공구가 받는 저항력을 절삭 저항이라고 하며 그 크기는 가공조건에 따라 다르다. 절삭 저항은 Fig. 3과 같이 절삭 방향으로 작용하는 주분력 Fx, 절삭공구의 축 방향 배분력 Fz, 이송 방향의 이송 분력 Fy로 나뉜다^[3].

주분력 Fx는 이송 분력에 직각 방향, 즉 다듬질면에 수직 방향으로 작용한다. 따라서 가공면에 발생하는 거칠기, 기복, 기울기 등 가공 정밀도를 좌우하는 중요한 또 다른 요인이 된다. 이송 분력은 상향절삭의 경우 이송과 같은 방향으로 작용한다. 하향절삭의 경우에는 이송과 반대 방향으로 작용한다^[3].

엔드밀 상향절삭의 경우, 회전 방향이 가공물의 표면으로 향하는 절삭 방법으로써 절삭 날이 Fig. 4와 같이 공작물을 완만하게 절삭해 들어가기 때문에 일반적으로 사용되는 가공법이다.

또한, 상향절삭은 다듬질 면을 엔드밀의 날 끝이

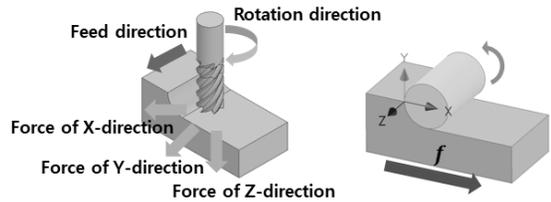


Fig. 3 Cutting force of end mill

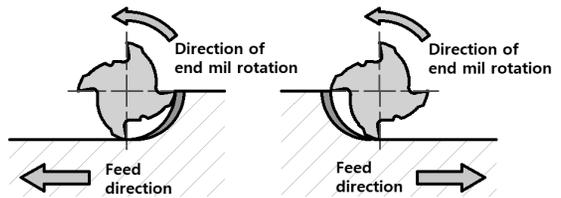


Fig. 4 Up cut and down cut milling

비비듯 하므로 절삭 면은 광택이 있고 표면 거칠기도 일반적으로 양호하지만, 칩 배출에 각별한 주의가 요구된다. 에어나 윤활제를 통해 적절하게 칩을 제거하지 않으면 칩이 엔드밀에 밀려 절삭 면의 표면 거칠기에 영향을 줄 수 있다^[5].

하향절삭은 공작물의 가공 면에서 내부로 향하는 절삭 방법으로써 다듬질 면 거칠기가 상향절삭보다 일반적으로 좋지 않다.

2.4 표면 거칠기

표면 거칠기는 어떤 가공된 면의 표면에 나타나는 작은 간격의 미세한 요철을 말하며 Fig. 5와 같이 주로 가공 과정에서 가공 방법이나 절삭 조건, 공구형상 등에 따라 모양과 크기가 다르게 나타난다.

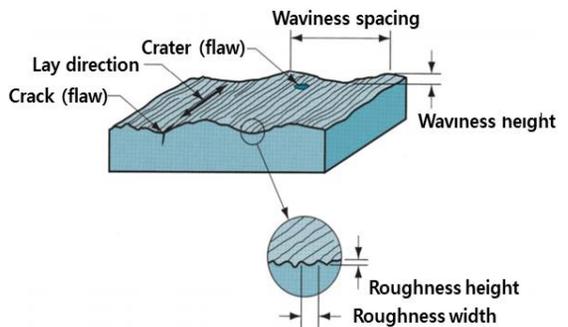


Fig. 5 Surface roughness of workpiece

다. 이는 기계적으로 가공된 모든 가공 면이 고유의 표면 입자 구조를 형성하게 되는데 실측표면의 공칭표면에 대한 변이를 말하는 것으로 거칠기(Roughness), 파상도(waviness), 결(Lay), 흠(Flaw) 등으로 이루어진다^[3].

3. 시험 장치 및 방법

3.1 시험 장치 및 기기

주축 회전체의 언밸런스 변동과 절삭표면 상태의 연관을 실험적으로 고찰하기 위하여 사용된 CNC 밀링머신은 국내 S사를 통해 주문 제작한 것으로서 Fig. 6과 같으며, 세부 규격은 Table 1에 나타내었다.

또한, 표면거칠기 측정 장치 세부 규격은 Table 2에 나타내었다.

본 실험에서 주축 회전체의 회전 질량 불균형에 따른 공작 기계의 회전정밀도를 실험적으로 고찰하기 위하여 표면 거칠기와 함께 진동 특성도 함께 확인하였으며 세부 규격은 Table 3과 같이 나타내었



Fig. 6 CNC milling machine

Table 1 Main specifications of CNC milling machine

X axis length (Max feed)	570(490)mm
Y axis length (Max feed)	570(490)mm
Z axis length (Max feed)	570(200)mm
Controller	MITSHBISH M700
X axis Motor	HF154S
Y axis Motor	HF154S
Z axis Motor	HF224BS-A48

Table 2 Main specifications of surface roughness tester

Model	KOSAKA SE - 3500K
Manufacturer	KOSAKA(Japan)
Meas. Parameter	Ra, Rmax, Rz etc.
Measuring range	X 100μm, Z 600μm
Meas. Resolution	0.1μm/mm
Table Size	150 X 150mm

Table 3 Main spec. of vibration analyzer

Model(Manufacturer)	A4300(ADASH)
Applicable Vib. Sensor	AC, DC, ICP, VDC
Channel	3 (2CH)
RPM Sensor	LASER SENSOR
FFT Resolution	Min. 25 ~ Max. 25 600 lines
Frequency Ranges	Maximum range: 0.5 Hz - 25 kHz Minimum range: 0.5 Hz - 25 Hz

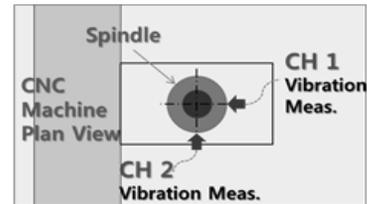


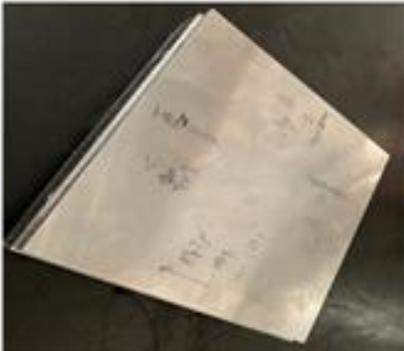
Fig. 7 Location of vibration asurement



Fig. 8 End mill

Table 4 Main spec. of end mill

Type	2 Blade square
Mat.	Carbide
Out Diameter	8mm
Length	70mm
Shank	8mm
Torsion angel	30°



150mm x 150mm x 50mm

Fig. 9 Material for experiment(SM45C)

Table 5 Material property for SM45C

Density (kg/m ³)	young's modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Poisson's ratio
7850	203	569	343	0.27

으며 진동계측기설치 위치는 Fig. 7과 같다.

시편의 절삭가공을 위해 사용된 엔드밀은 Fig. 8과 같으며 세부 규격은 Table 4에 나타내었다.

본 실험에 사용된 시편은 Fig. 9와 같은 SM45C를 사용하였으며, 물성치는 Table 5에 나타내었다.

3.2 시험방법

주축 회전체의 회전 질량 불균형 상태를 만들기 위하여 회전체 주축 유닛이 CNC머신에 조립된 상태로 Fig. 10에 표시된 위치에서 언밸런스량을 Table 6와 같이 최초 상태인 0g에서부터 5g, 10g, 15g 및 20g으로 변화를 주면서 측정하였다. 이때 주축 회전체의 RPM은 1500 RPM, 3000 RPM 및 4500 RPM으로 변화시키면서 측정하였으며, 이러한 과정은 상향절삭과 하향절삭에 대하여 각각 수행하였다. 시험 절차는 Fig. 11와 같이 순서도에 나타내었다.

Table 6 Unbalance mass addition order

Test Step	1	2	3	4	5
Unbalance Mass	0g	5g	10g	15g	20g

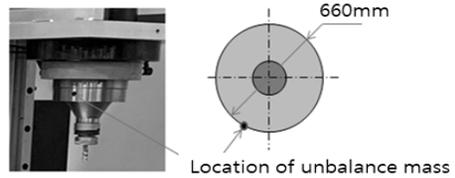


Fig. 10 Unbalance mass location

Table 7 Cutting condition of end mill

Cut. Direction	Spindle Speed (rpm)	Feed rate (mm/rev)	Depth (mm)
Up Cut.	1500	150	0.5
	3000	300	0.5
	4500	450	0.5
Down Cut.	1500	150	0.5
	3000	300	0.5
	4500	450	0.5

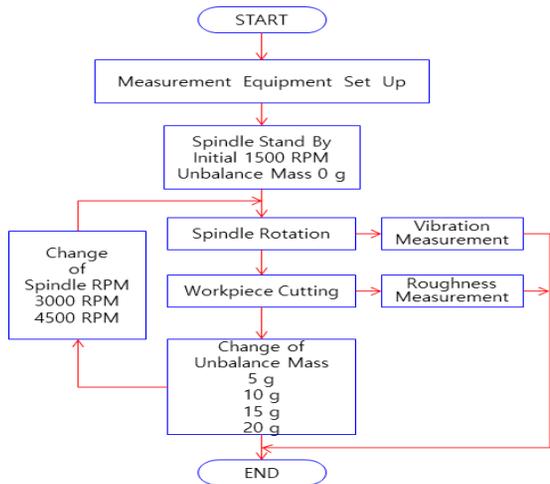


Fig. 11 Flow chart of measurement

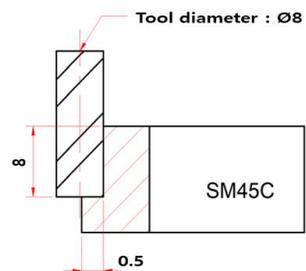


Fig. 12 Milling method

상향절삭과 하향절삭에 있어 주축 회전체의 회전 수(rev/mm), 이송속도(mm), 절삭 깊이에 대하여는 Table 7과 같이 나타내었으며, 시편의 가공은 Fig. 12과 같은 방법으로 수행하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 언밸런스량과 회전수에 따른 진동계측 결과

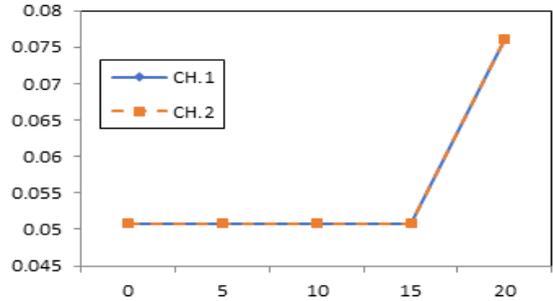
시험방법에서 언급한 바와 같이, 주축 회전체의 회전 질량 불균형 상태를 만들기 위하여 회전체 주축 유닛에 언밸런스량을 0g에서부터 5g, 10g, 15g 및 20g으로 변화를 주었고 RPM은 1500 RPM, 3000 RPM 및 4500 RPM으로 증가시키면서 측정하였다. 이때 진동 계측기는 Fig. 7과 같이 CH 1과 CH 2를 90도 각도로 동시에 계측하였다. 그 결과 Table 8과 같은 결과를 얻었으며 Fig. 13과 같이 RPM 별 경향을 그래프로 나타낼 수 있다.

본 결과에서 예측한 바와 같이 RPM이 증가할수록 진동 값은 증가 되는 것은 나타났으며, 주축 회전체의 언밸런스량을 0g에서부터 5g, 10g, 15g 및 20g까지 변화를 주었을 때, 1500 RPM에서의 진동 특성은 15g까지 동일하게 측정되었으며, 20g에서부터 증가하는 것으로 나타났다. 이때 CH 1과 CH 2는 동일한 진동 값이 계측되었다.

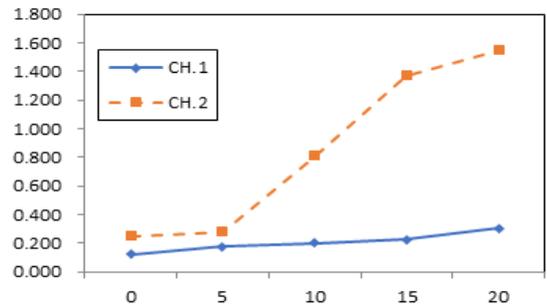
3000 RPM에서는 CH. 1의 경우 언밸런스량 0g에서 20g까지 점진적으로 증가 되었으나 CH. 2의 경우는 언밸런스량 0g에서 5g까지는 완만하게 진동 값이 증가하다가 10g부터 20g까지 급격하게 증가하여 가는 것을 확인할 수 있었다.

Table 8 Results of vibration measurement

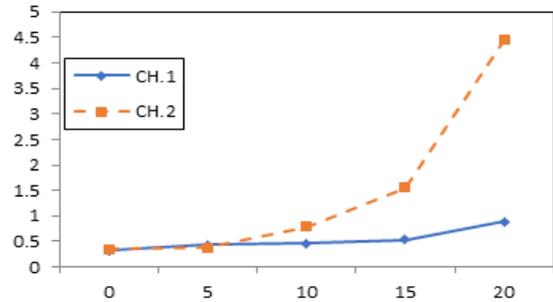
Unbalance Mass(g)	Vibration Value[mm/s]					
	1500rpm		3000rpm		4500rpm	
	CH. 1	CH. 2	CH. 1	CH. 2	CH. 1	CH. 2
0	0.051	0.051	0.125	0.251	0.325	0.358
5	0.051	0.051	0.178	0.279	0.432	0.381
10	0.051	0.051	0.203	0.813	0.457	0.787
15	0.051	0.051	0.229	1.372	0.533	1.549
20	0.076	0.076	0.305	1.549	0.889	4.445



(a) Results of vibration at 1500 RPM



(b) Results of vibration at 3000 RPM



(c) Results of vibration at 4500 RPM

Fig. 13 Vibration trend curve

4500 RPM에서는 CH 2에서는 0g에서 20g까지 비선형 그래프를 보이며 급격하게 진동 값이 증가 되었다.

한편 3000 RPM과 4500 RPM에서의 CH. 1 및 CH. 2의 진동 특성 차이가 크게 나타난 것은 주축 회전체의 유닛이 CNC머신에 조립된 상태에서 회전할 때 발생한 진동이 직사각 형태의 테이블에서 짧은 쪽 영향을 많이 준 것으로 추정된다.

4.2 언밸런스량과 회전수에 따른 표면 거

칠기 계측 결과

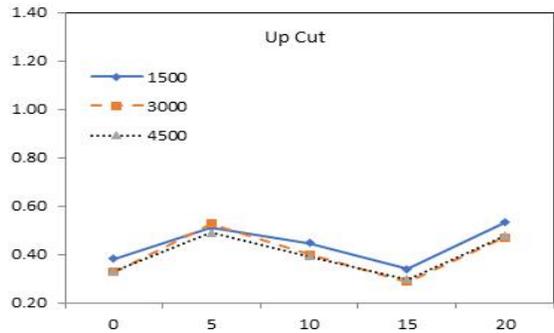
진동 계측과 동일한 방법으로 회전체 주축 유닛에 언밸런스량을 변화시키고, RPM을 점진적으로 증가시키면서 표면 거칠기를 측정하였다. 표면 거칠기 측정은 하나의 작업 표면에 대하여 3Point로 나누어 계측하고 이를 평균한 값으로 Fig. 14 및 Fig. 15와 같은 경향의 그래프로 나타내었다. 상향절삭에 있어서 각 RPM 별 언밸런스량에 따른 표면 거칠기는 Table 9과 같은 결과를 얻었으며, 하향절삭과 상향절삭 결과를 분리하여 나타내었다.

본 실험에서는 앞서 언급 한 바와 같이 엔드밀의 상향절삭에서 하향절삭보다 표면 거칠기가 더 양호한 결과를 얻었다. 특히 1500 RPM, 언밸런스량 20g에서는 상향절삭 거칠기(0.53 μm)대비 하향절삭 거칠기(1.21 μm)가 2.2배 증가 된 것으로 나타났다. 또한, 상향절삭의 경우는 RPM에 따른 거칠기 영향보다는 언밸런스량에 기인한 표면 거칠기 영향이 더 크게 나타났다.

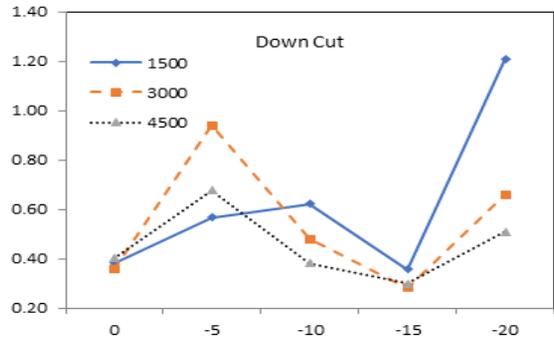
언밸런스량에 따른 표면 거칠기 영향을 보면 언밸런스량 15g에서 1500 RPM, 3000 RPM 그리고 4500 RPM에서 거의 일정한 표면 거칠기가 나타났으며(0.28 μm ~ 0.36 μm) 이러한 경향은 상향절삭과 하향절삭에서도 동일하게 나타난 현상이다. 표

Table 9 Roughness of down/up cut milling

RPM	Unbalance Mass(g)	Surface Roughness(μm)	
		Up Cut	Down Cut
1500	0	0.38	0.38
	5	0.51	0.57
	10	0.45	0.62
	15	0.34	0.36
	20	0.53	1.21
3000	0	0.33	0.36
	5	0.53	0.94
	10	0.40	0.48
	15	0.29	0.29
	20	0.47	0.66
4500	0	0.33	0.40
	5	0.49	0.68
	10	0.38	0.38
	15	0.30	0.30
	20	0.48	0.51



a) Roughness of up cut milling



(b) Roughness of down cut milling

Fig. 14 Roughness trend curve of the RPM of spindle by down/up cut milling

면 거칠기가 가장 크게 계측된 언밸런스량은 1500 RPM의 하향절삭 20g에서 나타났으며(1.21 μm), 이는 같은 하향절삭의 조건 0g에서의 표면 거칠기 (0.38 μm) 대비 3.1배 큰 값이다.

한편 언밸런스량이 0g에서부터 20g까지 증가할 때 표면 거칠기의 변화 경향을 살펴보면 언밸런스량에 비례하여 표면 거칠기가 선형적으로 증가 되는 것이 아니라 증감을 반복하는 경향을 볼 수 있었다. 예를 들면 하향절삭 3000 RPM의 경우 5g에서 1차 증가(0.94 μm) 되었다가 10g에서 감소(0.48 μm)하고 15g (0.28 μm)까지 표면 거칠기 값이 감소하였다가 20g에서 다시 증가(0.66 μm)하는 경향을 볼 수 있었다.

언밸런스량 5g에서 표면 거칠기가 상대적으로 크게 나타나는 현상은 상향절삭에서도 나타난 현상이며, 시험 진행한 모든 RPM에서 동일하게 계측되었다.

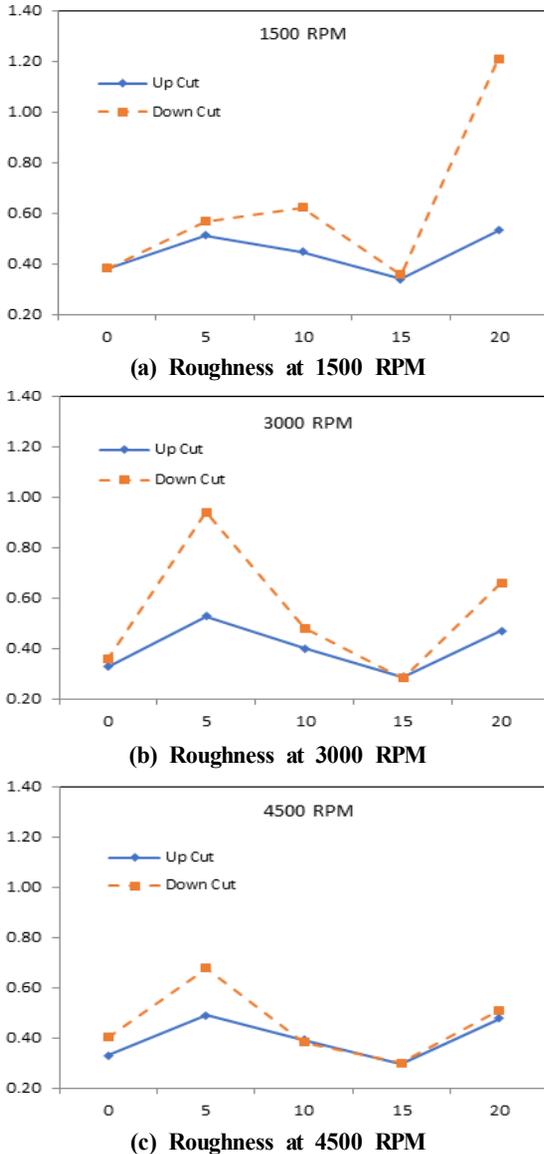


Fig. 15 Roughness trend curve of down/up cut milling by the RPM of spindle

이러한 현상은 앞서 고찰하였던 진동 특성 커브와 함께 분석해 보았을 때 5g에서 특별히 표면 거칠기가 증가할 이유는 없는 것으로 판단되며, 오히려 10g과 15g에서 언밸런스량이 증가 되었음에도 더 안정적인 상태가 된 것은 회전속도 증가에 따른 현상으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 메인 스피ndl의 회전 질량 불균형이 회전 정확도에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 연구하고자 하였다. 특히 언밸런스량에 따른 CNC 공작 기계의 진동 특성과 가공물의 표면 거칠기 관계를 확인하면서 메인 스피ndl의 불균형을 개선하고 회전 정확도를 유지해야 하는 기술적 이유를 고찰하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 주축 회전체의 회전수가 증가할 때 동일한 언밸런스량에서 진동량도 선형적으로 증가 되었다.
2. 언밸런스량이 증가 되었을 때 CH1과 CH2의 진동 계측 결과는 저속 회전인 1500 RPM에서는 거의 동일한 결과를 보였으나 3000 RPM과 4500 RPM에서는 5g, 10g, 15g 및 20g으로 언밸런스량을 증가시켰을 때 CH. 1은 선형적으로 완만하게 증가하였고 CH. 2의 경우는 비선형 그래프를 보이며 급격하게 진동 값이 증가 되었다. 이는 본 시험에 사용된 CNC 밀링머신의 특성으로 추정 된다. 이러한 추정 이유는 진동 계측기 중 CH. 1의 경우는 진동 값이 완만하게 증가함을 보였기에 추정하였다. 즉 공작 기계 설계 시 가능한 가로와 세로가 같은 비율로 설계될 경우 언밸런스 상태에서 회전정밀도 유지에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 본 내용은 향후 추가적인 연구가 수행되어야 할 과제이다.
3. 엔드밀 절삭가공에 있어 언밸런스 상태임에도 불구하고 상향절삭은 하향절삭과 비교하면 표면 거칠기가 더 양호하다는 것을 실험적으로 확인 하였다.
4. 상향절삭에 있어서 주축 회전체의 회전수 증가 보다 언밸런스량의 변화가 가공물의 표면 거칠기에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.
5. 언밸런스량이 증가 될 때 동일한 주축 회전체의 회전수에서 표면 거칠기는 선형적으로 증가 되지 않았고 3000 RPM과 4500 RPM, 언밸런스량 5g에서 표면 거칠기가 더 크게 나타났다. 이러한 현상은 진동 특성 커브와 함께 분석해 보았을 때 5g에서 표면 거칠기가 특별히 증가할 이유는 없는 것으로 판단되며, 10g과 15g에서 언밸런스

량이 증가 되었음에도 더 안정적인 상태가 된 것은 회전속도 증가에 따른 현상으로 보인다..

6. 본 실험 결과로서 임의로 설정한 언밸런스량에 따른 공작 기계의 진동 특성과 공작물의 절삭표면의 거칠기 상태의 상관관계를 확인하였고, 주축 회전체의 언밸런스를 향상하고 회전정밀도를 유지해야 하는 기술적 연관성을 고찰하였다.

본 연구는 창원시의 창원대학교 일반대학원 첨단방위공학대학원지원사업으로 수행하였습니다.

REFERENCES

1. Kim, J. H., “Rotating accuracy estimating model verification of high speed spindle with angular contact ball bearing”, A Thesis for a Master, Pusan National University, Republic of Korea, 2014.
2. Lee, K. B., “Roughness Measurement of SM20C Surface Machined by End-milling”, A Thesis for a Master, Kyungnam University, Republic of Korea, 2007.
3. Oh, S. K., “A study on the Surface Roughness in End-mill Machining of Aluminum Alloy(KSD 6061) for the Automobile Parts”, A Thesis for a Master, Nambu University, Republic of Korea, 2013.
4. Lee, B. S., Vibration and Maintenance Handbook of Rotary Machinery, Korea Electric Power Corporation, pp. 1379-1384, 1998.
5. “Characteristic of End Mill”(2008), <https://tooling-tistory.com/entry> (accessed 9, Dec., 2019)
6. Yoon, S. H., Moon, S. M., Lyu, S. K., “A Study on Monitoring Drilling using Torque from Main Spindle Based on PLC in CNC Machine Tools”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 3, pp. 7~15, 2018.