

티타늄 합금의 얇은 벽 밀링가공에서 가공방법에 따른 진동특성 및 가공품질에 관한 연구

김종민*, 구준영**, 전차수***,#

*경상국립대학교 대학원, 한국치공구공업(주), **베틀기계(주),
***경상국립대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

A Study on Vibration Characteristics and Machining Quality in Thin-wall Milling Process of Titanium Alloy

Jong-Min Kim*, Joon-Young Koo**, Cha-Soo Jun***,#

*Graduate School, Gyeongsang National Univ., and KJF, **Bethel Machine Tool,

***Department of Industrial and Systems Engineering & Engineering Research Institute,
Gyeongsang National University

(Received 03 November 2021; received in revised form 08 December 2021; accepted 19 May 2022)

ABSTRACT

Titanium alloy (Ti-6Al-4V) has excellent mechanical properties and high specific strength; therefore, it is widely used in aerospace, automobile, defense, engine parts, and bio fields. Particularly in the aerospace field, as it has a low specific gravity and rigidity, it is used for the purpose of increasing energy efficiency through weight reduction of parts, and most have a thin-walled structure. However, it is extremely difficult to machine thin-walled shapes owing to vibration and deformation. In the case of thin-walled structures, the cutting forces and vibrations rapidly increase depending on the cutting conditions, significantly affecting the surface integrity and tool life. In this study, machining experiments on thin-wall milling of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) were conducted for each experimental condition with different axial depths of cut, radial depth of cut, and machining sequence. The machining characteristics were analyzed, and an effective machining method was derived by a comprehensive analysis of the machined surface conditions and cutting signals.

Keywords : Ti-alloy(티타늄 합금), Milling Process(밀링공정), Thin-walled Structure(얇은 벽 구조), Cutting Signal(절삭 신호), Machined Surface(가공표면), FFT Analysis(FFT 분석)

1. 서 론

티타늄 합금(Ti-6Al-4V)은 고온 강도 및 내부식성, 경도 등 기계적 성질이 우수하고 비강도가 높아 항공, 우주, 자동차, 방위산업 등과 바이오 의료^[1] 분야까지 산업 전반에 걸쳐 사용량이 증가하고

있다. 티타늄 합금은 알루미늄과 함께 대표적인 경량 소재로 비중이 낮고(4.5g/cm^3) 강성비가 커서 특히 항공 우주 분야에서 에너지 효율을 높이기 위한 경량화를 위해 널리 쓰이고 있다.

특히, 항공기 부품의 골조는 얇은 벽 구조로 설계되고 중량을 줄이기 위해 밀링이나 선반 장비로 절삭 가공을 해야 한다. 일반 구조용 강과 알루미늄 합금의 경우 다양한 형태의 형강이 생산되고 있어 필요한 형태를 그대로 활용하거나 약간의 소

Corresponding Author : csjun@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1693, Fax: +82-55-772-1699

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.

성 가공만으로 적소에 사용할 수 있으나 티타늄 합금의 경우 바(bar) 상태의 원자재를 설계상 요구 형태로 기계 가공을 해야 하므로 많은 소재 제거율로 인한 과도한 가공 시간과 공구 마모, 표면 건전성 악화 등 생산 비용이 증가한다. 또한, 티타늄 합금은 대표적인 난삭재로 높은 경도 때문에 절삭 시 공작물과 절삭 공구의 저항이 커서 절삭 날이 파손되는 등 공구 수명이 짧아지고 칩핑(chipping) 현상이 일어난다. 또 열전도율이 낮아서 가공 시 발생한 열이 확산이 되지 않고 공구 온도를 급격히 상승시켜 공구가 쉽게 마멸되고 공작물의 표면 건전성에도 좋지 않은 영향을 준다^[2].

선행 연구 사례를 보면 A. Ginting 등^[3]은 카바이드 코팅된 절삭 공구로 티타늄 합금의 건식 가공 시 표면 건전성에 대한 연구를, Shin 등^[4]은 항공기 박판 구조의 가공 가능 폭과 두께에 관한 연구를 하였고, Hong 등^[5]은 엔드밀 가공 시 진동, 표면 거칠기, 절삭온도에 미치는 최적 가공조건 선정에 관한 연구를 하였다.

또, 절삭가공 시 채터링(chattering)과 가공변형이 생기기 쉽다. 이로 인해 치수정밀도와 가공품질을 충족하기 어렵고 공구수명이 단축되는 문제가 있으며, 이를 해결하기 위해 다양한 연구가 수행되었다. B. V. Ramanaiyah 등^[6]은 알루미늄 합금의 얇은 벽 형상 밀링 가공에서 주축회전속도, 이송량, 그리고 절삭깊이가 얇은 벽의 휨 변형과 표면거칠기에 미치는 영향에 대해 연구하고, 회귀모델을 이용한 예측모델을 도출하였다.

R. Izamshah 등^[7]은 티타늄 합금의 얇은 벽 밀링 가공에서 휨 변형량을 예측하기 위해 유한요소해석과 가공실험을 통한 통계적 방법을 이용하여 예측모델을 도출하였다. X. Dang 등^[8]은 포켓형태의 얇은 벽 구조에 대한 밀링 가공에서 점성유체(Viscous fluid)가 채터진동의 억제에 미치는 영향에 대한 선행 연구들이 있다.

본 논문은 항공기 기체 부품중 티타늄 합금의 ‘-’자형 구조를 갖는 얇은 벽 가공실험을 통하여 밀링 가공 시 가공경로(cutter path)와 축 방향 깊이를 달리했을 때 얇은 벽 표면상태와 절삭 신호 분석(analysis of cutting signal)으로 효과적인 가공방법을 도출하였다.

2. 티타늄합금의 얇은 벽 밀링 가공

2.1 실험장치 구성

실험은 Makino사의 주축회전 속도 20,000rpm 급의 V55 3축 고속 머시닝센터에 공구동력계를 장착하여 절삭력 신호를 획득하고 진동 특성 분석을 위해 X축, Y축 방향으로 가속도계를 부착해서 가공 시 시편에 발생하는 진동을 가속도 신호로 획득하였다. 절삭력 신호는 RMS(Root mean square) 연산으로 평균값을 구하고, 가속도 신호는 시영역(Time domain) 분석을 수행해서 FFT 변환을 통해 주파수 영역 분석을 수행하였다.

가공 시편 소재는 항공우주용 내열 합금인 티타늄 합금(Ti-6AL-4V), 절삭 공구는 직경 10mm의 4날 텅스텐카바이드 코팅 엔드밀과 절삭유를 사용하여 가공하였다. Table 1에 실험 장비 목록을, Fig. 1에 실험장치 구성을, Fig. 2에 실험 방법과 신호 획득 체계를 나타내었다.

Table 1 Experimental equipment

Equipments	Models & makers
Machine tool	V55, Makino
Signal processing PGM	Labview2014,NI
Accelerometer	Type 4372, B&K
Microphone	Type 4189, B&K
DAQ board	PCI-4472B, NI
Endmill	YG-1 XPowerS
Diameter,D(mm)	10.0
The number of teeth,Z	4
Work Material	Ti-6AL-4V

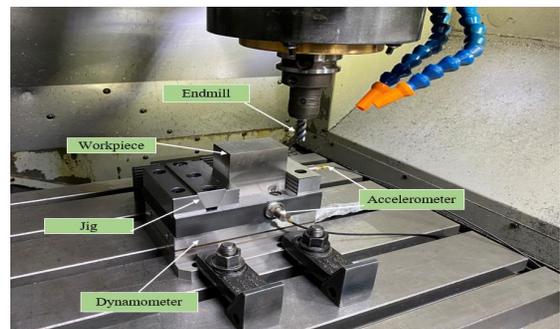


Fig. 1 Experimental setup

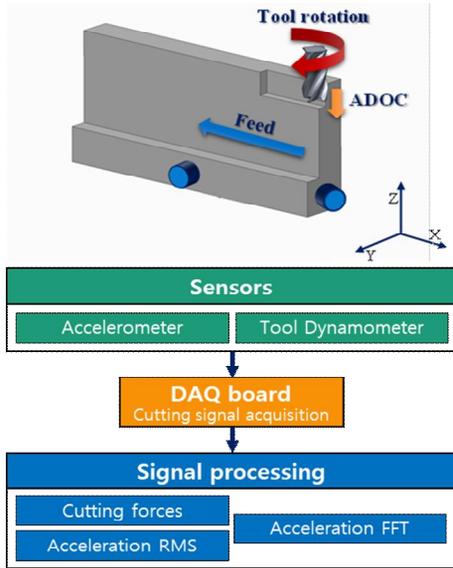


Fig. 2 Schematic diagram of experiment method

2.2 실험 방법

2.2.1 시편 준비 및 사전 가공

70 x 50 x 50(mm) 사이즈의 Ti합금(Ti-6AL-4V)을 15.0mm 두께, 길이 24.0mm로 ‘-’자형 형상으로 사전 가공한 시편을 준비하고 얇은 벽 가공 실험을 수행하였다. Fig. 3에 형상을 나타내었다.

2.2.2 실험 방법

가공 실험은 축(ADOC) 방향으로 4스텝, 반경(RDOC) 방향은 3스텝으로 나누어 축 방향의 절삭 깊이는 실험 1과 실험 2는 스텝당 6.0mm의 절삭 깊이로, 실험 3은 스텝별로 절삭 깊이를 3.0, 5.0, 7.0, 9.0mm로 차등 적용하여 절삭 깊이는 모두 24mm가 되게 가공하였다. 반경 방향의 절삭 깊이는 모든 실험에서 각 스텝별로 2.0, 2.0, 1.0mm 순으로 가공하는 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 실험 1은 시편의 한쪽 면(Side A)을 반경 방향으로 5mm를 완전히 가공한 후 반대쪽 면(Side B)을 가공하는 방식(single direction step)이고 실험 2와 3은 A면과 B면을 스텝별로 번갈아 가면서 가공하는 방식(waterline step)으로 실험하여 최종 폭 70.0mm, 높이 24.0mm, 두께 5.0mm의 ‘-’자형 얇은 벽 구조를 생성하였다. Fig. 5에 절삭 가공 방법에

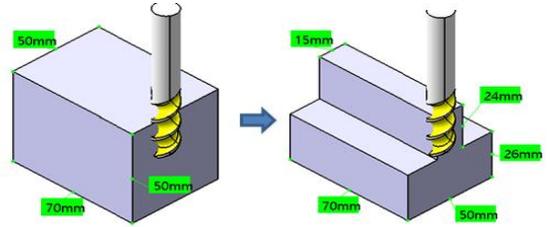


Fig. 3 Experimental Method

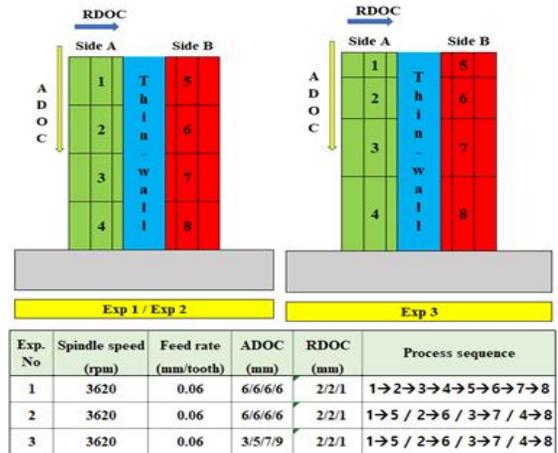


Fig. 4 Experimental conditions and Process sequence

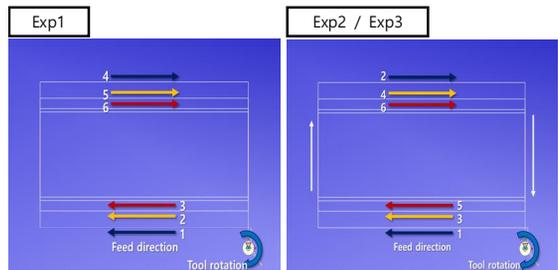


Fig. 5 Tool path according to experiments

대해 나타내었다. 이 실험에서 사용한 주축회전수, 이송속도, 날당 이송량 등 절삭조건은 티타늄 합금의 밀링 가공 최적화 조건^[6]을 적용하였다.

2.3 실험 결과 및 고찰

2.3.1 가공표면 상태 분석

각 실험 조건에 따라 ‘-’자형 얇은 벽 형상을 가공한 후 표면상태를 비교 분석하였다. 실험 1의

표면상태는 가공 시 발생한 진동으로 인한 불규칙한 툴 마크(Tool mark)가 크게 발생하였다. 실험 2는 표면에서 규칙적인 툴 마크가 관찰되지만 가장 양호한 표면상태를 보여준다. 실험 3은 절삭 깊이를 3, 5, 7, 9mm로 차등을 둔 실험으로 툴 마크가 가장 크게 관찰되며 스텝 구간마다 소재의 밀립 흔적이 발견된다. 이는 스텝별 다른 절삭 깊이에 따른 진동에 의한 것으로 사료되며 신호 분석을 통해서 가공표면 품질 차이의 원인을 파악하였다. Fig. 6에 각 실험 별 표면상태를 나타내었다.

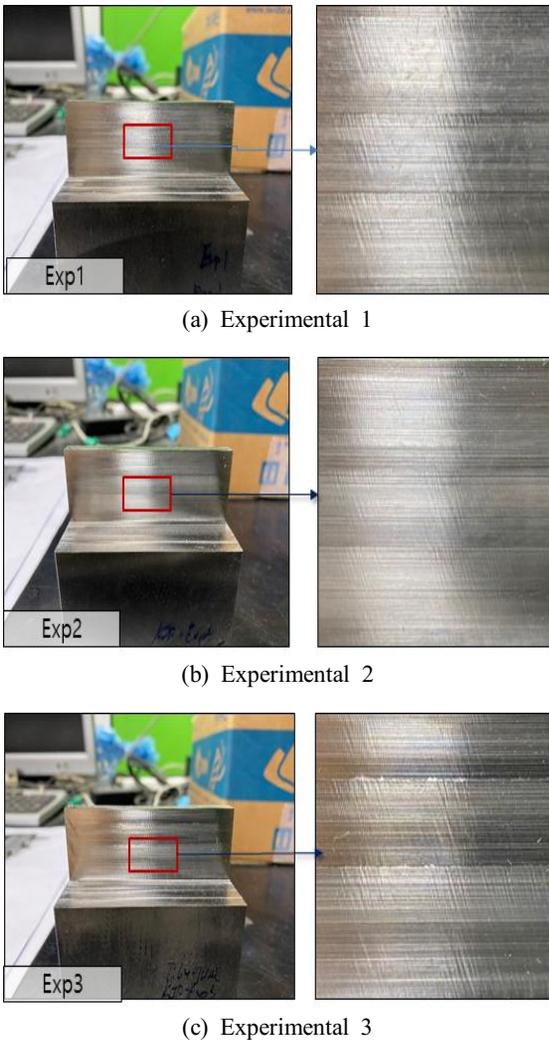


Fig. 6 Machined surface condition

2.3.2 절삭력 및 가속도 RMS 신호분석

(1) 절삭력(Cutting forces) 분석

실험 1은 축방향 동일한 절삭 깊이로 A, B면 전체 8 스텝을 가공한 결과 절삭력에는 큰 차이가 발생하지 않았다. 실험 2는 A, B면 교차 가공으로 모든 스텝을 가공한 결과 절삭력에는 큰 차이가 없으나 하단부가공에서 절삭력이 감소하는 현상이 나타났다. 실험 3은 축 방향 절삭 깊이를 달리하여 A, B면을 교차 가공 형태의 실험으로 스텝 1에서는 축방향 깊이가 3mm로 절삭력이 제일 낮게 나왔으나 절삭 깊이에 따라 절삭력이 증가하며 스텝 4와 스텝 8 구역의 하단 부에서는 절삭력이 낮게 관찰되었다. Fig. 7에 각 실험별 절삭력 크기를 나타내었다.

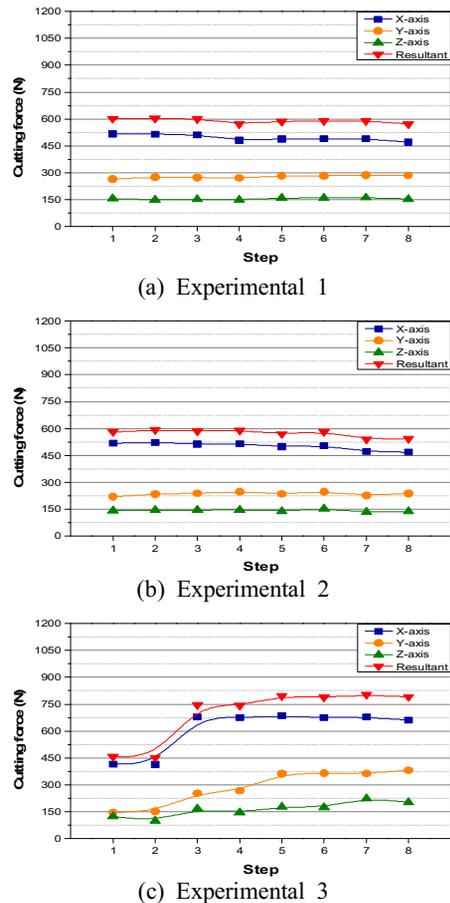


Fig. 7 Cutting force

(2) 가속도 RMS 분석

실험 1은 A면을 완전히 가공한 후 다른 B면을 가공하는 방식으로 인해 축 방향 스텝별로 모두 반대편 가공 시 진동 가속도가 높게 관찰된다. Y 축 방향 진동 가속도가 X축보다 더 높게 나타나며 이는 반경 방향 절삭 깊이로 인해 주 충격 방향이 길이 방향이기 때문으로 판단된다. 특히 상단부 가공인 스텝 1과 5에서 매우 높게 나타나며 이는 상단부 가공 시 외팔보 구조물의 끝부분을 충격하는 형태이기 때문에 진동이 크게 발생한 것으로 사료된다. 실험 2는 축 방향 스텝별로 가속도 RMS를 비교한 결과 A면 가공 후 반대편 가공 시 가속도가 더 높게 나타났다. 상단부인 스텝 1에서 가속도 RMS가 높게 나타나며 이는 상단부 가공 시 외팔보 구조물 형태의 영향으로 판단된다. 또, 하단부 스텝 4에서 가속도 RMS가 낮게 나타나는데 이는 절삭력과 유사한 경향을 보여준다. 실험 3은 축방향 절삭 깊이를 달리 하며 A, B면을 교차 가공하는 실험으로 A 면 가공 후 B 면 가공 시 가속도가 더 높게 나타난다. 스텝 1의 가속도 RMS가 낮게 나타나는 것은 축 방향 절삭 깊이가 3.0mm로 실험 1과 2의 절삭 깊이 6.0mm에 비해 작기 때문으로 사료된다. Fig. 8에 가속도 RMS 그래프를 나타 내었다.

Fig. 9는 실험조건별 반경 방향(RDOC) 스텝 1의 가속도 RMS를 비교하였는데 A면 가공에 비해 B면 가공 시 가속도 RMS 수치가 높게 나타난다. 이는 강성 문제로 판단되고 얇은 벽 가공시 한쪽 면을 먼저 가공하면 단면적 감소로 인해 관성 모멘트가 감소하고 이로 인해 동일한 절삭력과 충격이 가해질 경우 진동이 상대적으로 더 크게 발생한 것으로 보인다. 실험 2의 가속도 RMS가 가장 낮게 나타남을 알 수 있다. Fig. 10은 반경 방향의 정삭 가공에 해당 되는 스텝 3의 그래프로 A면 가공에 비해 B면 가공 시 가속도 RMS 수치가 증가하는데 이 또한, 강성 문제로 판단되고 스텝 1과 마찬가지로 스텝 3에서도 실험 2의 가속도 RMS가 가장 낮게 나타났다. 이를 통해서 실험 2가 진동 측면에서 가장 안정적인 가공방법으로 판단되며 이는 가공면 표면 상태 실험 결과와도 일치함을 확인하였다.

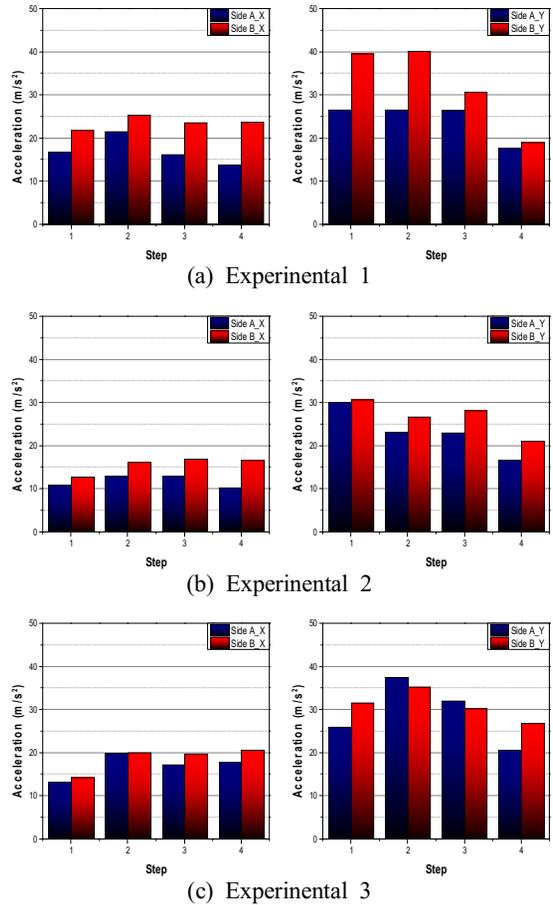


Fig. 8 Acceleration RMS

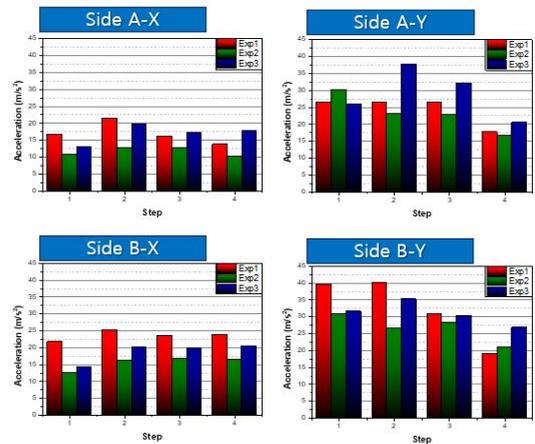


Fig. 9 Acceleration RMS of RDOC(Step 3)

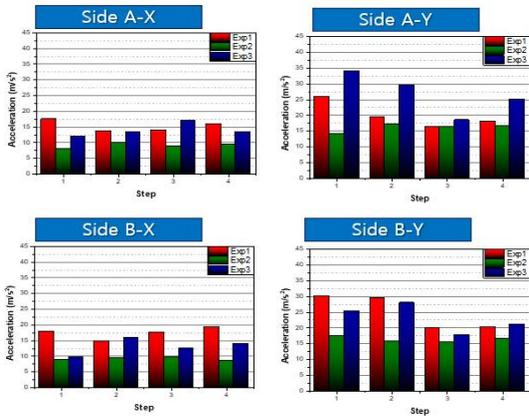


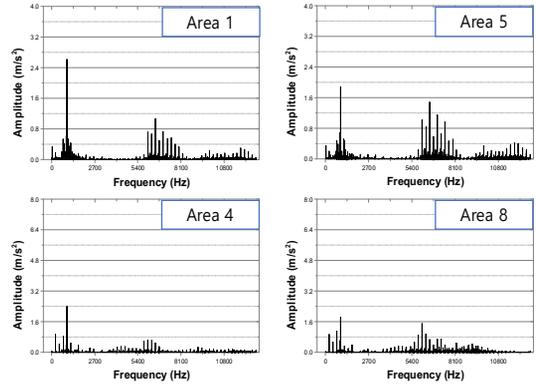
Fig. 10 Acceleration RMS of RDOC(Step 3)

(3) FFT(fast Fourier transform) 분석

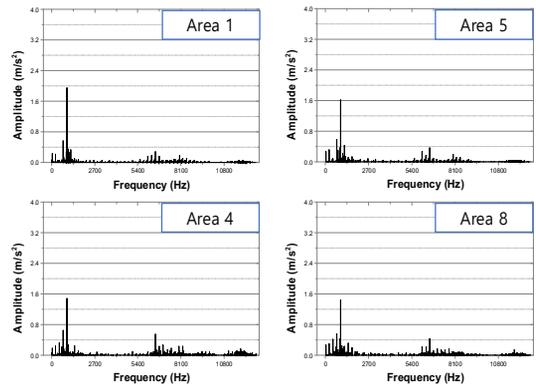
각 실험 별 가속도 신호에 대한 FFT 분석을 하여 그래프로 나타내었다. 실험 1은 A 면을 완전히 가공한 후 반대쪽 B 면을 가공하는 방식으로 상단부 가공에서 축 방향 스텝 1번 영역 가공 주파수 수치보다 B면 5번 영역 가공 시 배수 주파수의 수치가 증가하며, 이는 한쪽 면이 완전히 제거된 시편의 강성이 저하되어서 발생하는 현상으로 판단된다. 하단부가공 시에는 공구접촉에 의한 충격이 외팔보 구조의 고정부에 작용하여 진동이 상대적으로 적게 발생하며, 주파수 피크치가 상단부 가공 시보다 낮게 나타나고 5,400~8,100Hz 주파수 대역에서 4번 영역보다 8번 영역 가공 시 상대적으로 높은 수치가 관찰된다.

실험 2는 동일한 축 방향 절삭 깊이로 양면을 교대로 가공하는 방식으로 상단부인 스텝 1번 영역 가공 시 주파수 수치와 5번 영역 가공 시 주파수 수치에 큰 변화가 없게 나타났다. 이는 양면을 교차로 가공함으로써 소재 제거로 인한 강성저하가 적기 때문에 진동 발생을 억제하여 일어난 현상으로 판단된다. 하단부가공 시에는 공구접촉에 의한 충격이 외팔보 구조의 고정부에 작용하여 진동이 상대적으로 적게 발생하며, 주파수 피크치가 상단부 가공 시보다 낮게 나타나고 스텝 4번 영역보다 8번 영역 가공 시 500~2,400Hz 영역의 주파수 밀도가 약간 증가하나 큰 차이는 발생하지 않음을 알 수 있다. 실험 3은 얇은 벽 가공 시 축

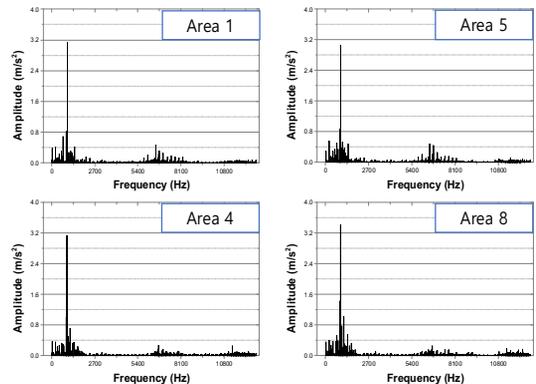
방향 스텝별 절삭 깊이를 달리하여 양면을 교대로 가공하는 방식으로 가공실험을 진행하였다. 상단부인 스텝 1번 영역 가공 시보다 B면 5번 스텝



(a) Experimental 1



(b) Experimental 2



(c) Experimental 3

Fig. 11 FFT analysis

영역 가공 시 500~2,400Hz 영역의 주파수 밀도와 수치가 일부 증가하는 모습이 보인다. 하단부가공 시에는 공기접촉에 의한 충격이 외팔보 구조의 고정부에 작용하여 진동이 상대적으로 적게 발생하며, 5,500~8,100Hz 대역의 피크치가 상단부 가공 시보다 낮게 나타나고 A면 4번 영역보다 B면 8번 영역 가공 시 500~2,400Hz 영역의 주파수 밀도와 수치가 증가하는 경향이 나타났다. Fig. 11은 주요 영역별 FFT 분석 그래프를 나타내었으며 각 스텝별 가공된 면을 영역(Area)으로 표기하였다.

Fig. 12는 실험조건별 가공 위치에 따른 X축 방향의 가속도 신호의 특성을 파악하기 위해 FFT 그래프를 분석하였다. 실험 1은 한쪽 면이 완전히 제거된 B면 상단부 스텝 5번 영역 가공 시 5,500~8,100Hz 영역대의 피크치와 주파수 밀도가 매우 높게 나타나며 배수 주파수들도 높은 수치를 나타낸다. 이는 한쪽 벽면이 완전히 제거된 상태로 반대쪽 면을 가공함으로써 강성저하로 인한 시편의 진동이 심하게 발생하는 것으로 사료 된다. 실험 2의 경우 0~2,500Hz 낮은 영역대에 피크치들이 주로 관찰되는데 이는 교차 가공으로 인한 구조적 강성 저하를 최소화하였기 때문으로 판단된다. 실험 3은 0~2,500Hz 영역의 주파수 피크가 가장 높게 나타나며, 피크 밀도가 집중되어 있고 진동이 가장 크게 발생한 것으로 파악된다. 또 하단부는 실험 2의 축 방향 절삭 깊이가 6.0mm인데 반해 실험 3은 축 방향 절삭 깊이가 9.0mm이므로 절삭력이 크게 작용하여 진동 가속도가 더 크게 측정된 것으로 사료된다.

Fig. 13은 Y축 가속도 FFT 그래프 분석으로 길이 방향 가속도 신호에 비해 부엽들이 적게 관찰되며 주파수 밀도가 낮게 나타나고 상단부보다 하단부가공에서 피크 수치가 낮게 관찰된다. 실험 3은 0~2,500Hz 영역의 주파수 피크가 가장 높게 나타나며, 진동이 가장 크게 발생한 것으로 파악된다. 특히 상단부에서 피크가 가장 높게 나타났다. 실험 2는 주 절삭주파수 영역 이외에 진동으로 인한 배수 주파수의 수치가 다른 실험에 비해 낮으며, 이를 통해 가장 진동이 적고 안정적으로 얇은 벽 가공이 이루어진 것으로 판단된다.

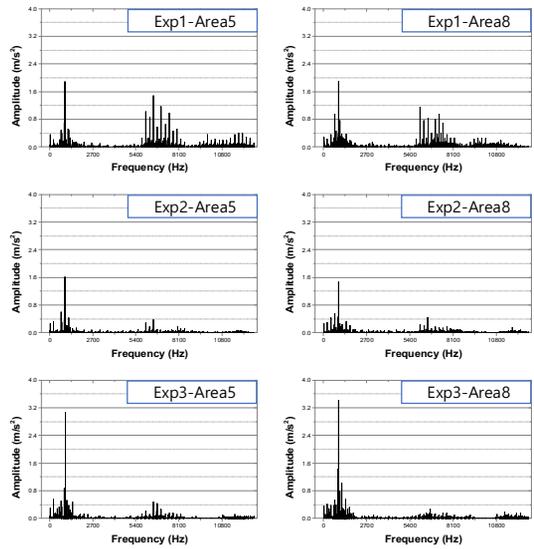


Fig. 12 FFT analysis of X-Axis

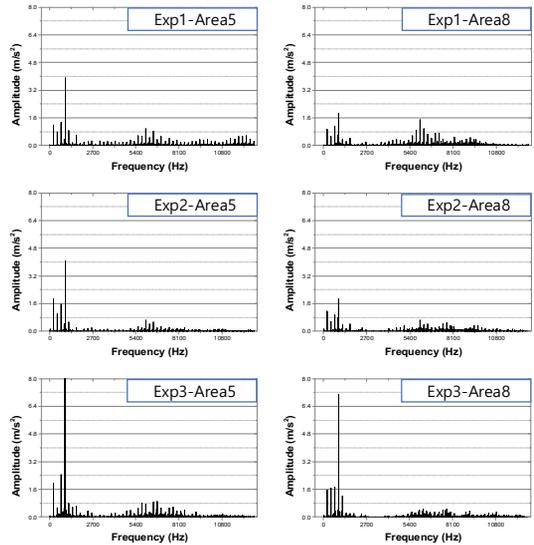


Fig. 13 FFT analysis of Y-Axis

3. 결론

티타늄 합금의 얇은 벽 형상 밀링 가공에서 가공조건에 따른 가공 특성을 파악하기 위해 실험을 수행하였다. 가공영역별 가공순서 및 축 방향 절삭 깊이를 달리하여 가공표면 상태와 절삭력 신

호, 가속도 신호를 분석하여 가장 효과적인 가공 방법에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 얇은 벽 가공에서 동일한 절삭 깊이로 양쪽 면을 교차(Waterline)로 가공한 실험 2의 가공표면이 한쪽 면을 모두 가공한 후 반대 면을 가공하는 실험 1보다 더 우수한 것으로 파악되며, 이는 한쪽 면이 먼저 제거된 실험 1은 강성이 저하되어 반대편 가공 시 진동이 상대적으로 심하게 발생 되어 표면 상태가 불량한 것으로 판단된다.
- 2) 절삭력 신호와 가속도 RMS 신호의 분석을 통해 실험 2가 가장 낮은 수치를 나타내었으며, FFT 분석 결과 주파수 피크치와 밀도 면에서 실험 2가 가장 안정적으로 나타난다.
- 3) 이는 교차 가공으로 강성저하를 최소화하였기 때문에 진동면에서 효과적인 것으로 파악되며, 얇은 벽 가공 시 실험 2에 적용된 가공방법을 적용하는 것이 가장 효과적이고 안정적인 것으로 파악되었다.

결론적으로 가공표면 상태, 절삭력 및 가속도 신호에 대한 분석을 종합하면 실험 2와 같이 동일한 Step-down량으로 얇은 벽을 워터라인 형태로 교차 가공하는 것이 가공 품질 면에서 효과가 가장 높은 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Rack, H. J. and Qazi, J. I., "Titanium alloys for biomedical applications," *Materials Science and Engineering:C* Vol. 26, Issue. 8 pp. 1269-1277, 2006.
2. Lee, Y. T., *Titanium(in Korean), Iron and Steel News*, 2016.
3. Ginting, A. and Nouari, M., "Surface integrity of dry machined titanium alloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, Issues 3-4, pp. 325-332, 2009.
4. Shin, Y. B. and Kim, S. J., "An Experiment of Machineable Width and Thickness of Airframe Thin Plate Structure," *Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 22, No. 1 pp. 162-167, 2013.
5. Hong, D. K., Kim, D. Y. and Ahn, C. W., "The Study on the Optimal Working Condition for Vibration, Surface Roughness and Cutting Temperature in End-milling," *Transaction of KSNVE*, Vol. 14, No. 12, pp.1322-1329, 2004.
6. Ramanaiah, B. V., Manikanta, B., Ravi Sankar, M., Malhotra, M. and Gajrani, K. K., "Experimental Study of Deflection and Surface Roughness in Thin Wall Machining of Aluminum Alloy," *Materials Today: Proceedings* 5, pp. 3745-3754, 2018.
7. Izamshah, R. A., Mo, J.P.T. and Songlin, D., "Hybrid deflection prediction on machining thin-wall monolithic aerospace component," *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, Iss. 4, 592-605, 2012.
8. Dang, X. B., Wan, M., Zhang, W. H. and Yang, Y., "Chatter analysis and mitigation of milling of the pocket-shaped thin-walled workpieces with viscous fluid," *International Journal of Mechanical Sciences* Vol. 194, 2021.
9. Kim, J. M., Koo, J. Y., Kim, J. S. and Jun, C. S., "Optimization of Machining Conditions in Milling of Titanium Alloy(Ti-6Al-4V)," *Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 10, pp. 60-67, 2019.