

티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 밀링가공에서 L자형 얇은 벽 구조의 가공품질 향상

김종민*, 구준영**, 전차수***,#

*경상국립대학교 대학원, 한국치공구공업(주), **벤틀기계(주),

***경상국립대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

Improving Machining Quality of L-Shaped Thin-Walled Structure in Milling Process of Ti-Alloy (Ti-6Al-4V)

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 19 August 2021; received in revised form 16 September 2021; accepted 29 September 2021)

ABSTRACT

Titanium alloy (Ti-alloy) is widely used as a material for core parts of aircraft structures and engines that require both lightweight and heat-resistant properties owing to their high specific stiffness. Most parts used in aircraft have I-, L-, and H-shaped thin-walled structures for weight reduction. It is difficult to machine thin-walled structures owing to vibrations and deformations during machining. In particular, cutting tool damage occurs in the corners of thin-walled structures owing to the rapid increase in cutting force and vibration, and machining quality deteriorates because of deep tool marks on machined surfaces. In this study, milling experiments were performed to derive an effective method for machining a L-shaped thin-walled structure with Ti-alloy (Ti-6Al-4V). Three types of machining experiment were performed. The surface quality, tool wear, cutting force, and vibration were analyzed comprehensively, and an effective machining method in terms of tool life and machining quality was derived.

Keywords : Ti-alloy(티타늄 합금), Milling Process(밀링가공), Thin-walled Structure(얇은 벽 구조), Cutting Signal(절삭 신호), Machined Surface(가공표면), Tool Wear(공구마모)

1. 서론

최근 전반적인 산업의 발전 추세에 따라 항공기, 자동차, 원자력, 우주개발 및 생체 분야 등 첨단산업 분야에 특수합금의 적용이 급격히 증가하고 있다. 특수합금은 일반적으로 독특한 기계적

특성을 갖고 있으며, 난삭재인 경우가 많다.

그중 티타늄 합금은 경량 특성을 가지면서 내열성, 내부식성, 그리고 높은 비강도 등 우수한 기계적 특성을 가지고 있어, 우주항공 및 바이오 산업의 정밀 부품용 소재로 각광 받고 있다. 특히 우주항공 분야에서 고속 기동성이 최우선으로 요구되는 전투기뿐만 아니라 경제성이 중요시되는 민간 항공기에도 부품 경량화를 통한 중량 감소 목적으로 근래 개발된 비행기에 티타늄 소재 사용이

Corresponding Author : csjun@gnu.ac.kr

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

약 100% 이상 늘어나고 있다. 이는 티타늄 합금의 높은 비강도로 인해 강성과 강도를 유지하면서 얇은 벽 구조의 경량화가 가능하기 때문이다.

그러나 티타늄은 대표적인 난삭재로 열전도율이 낮아 절삭 가공 시 급격한 가공 온도 상승으로 공구마모가 급속히 진행되며, 절삭날에 생성되는 구성인선(Built-up edge)으로 인해 코팅과 공구소재 박리가 발생하여 공구 수명이 단축되어 생산성이 저하되며, 공작물의 가공 정도를 얻는데 어려움이 있다. 또한, 탄성계수가 낮아서 진동 발생과 공구의 저항에 제품이 밀려나 가공품질 유지에 어려움이 있고 표면 건전성이 저하 되어 두께가 얇은 재료일 경우에는 탄성변형으로 인해 정밀한 가공이 힘들다고 알려져 있다^[1].

Kahles 등^[2]은 신소재로서 티타늄 합금의 기계적 성질과 가공성에 대한 연구를, Campa 등^[3]은 항공기 부품의 얇은 바닥 밀링작업 시 절삭 깊이와 회전수에 따른 진동발생에 관한 연구를 하였다. Bhaumik 등^[4]은 티타늄 합금의 공구마멸 특성에 대한 연구를 하였고, Lee 등^[5]은 범용 커터와 전용 커터를 사용하여 항공용 티타늄 합금 가공공정의 지속가능성에 대한 연구를 하였다. Koo 등^[6]은 알루미늄 합금의 얇은 벽 고속밀링 가공 시 가공표면 상태와 가공변형 특성을 연구하였고 Bae 등^[7]은 절삭 깊이와 절삭 시간에 따라 절삭 가공 중에 발생하는 절삭 열 및 공구 마모량에 대한 연구와 Fujisan Sun 등^[8]은 티타늄가공 그루브 공구 성능에 관한 연구들을 하였다.

본 논문에서는 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)을 활용한 항공기 부품의 L자형 구조 얇은 벽 가공에 있어 가공품질과 공구 수명 측면에서 효과적인 가공 방법을 도출하고자 한다.

2. 티타늄합금(Ti-6Al-4V)의 L자 형상 얇은 벽 밀링 가공

2.1 실험 개요

L자형 구조 밀링가공 시 코너부 가공은 사이드 밀링(Side milling)에서 슬롯 밀링 형태로 순차적으로 가공 형태가 변화하면서 절삭면적이 증

가하고 이로 인한 부하증가로 인해 진동이 심하게 발생하여 공구 수명과 가공품질이 저하되는 문제가 발생하는데 Fig. 1에 사이드 밀링에서 슬롯 밀링으로 전환되는 형태를 나타내었다.

2.2 실험장치 구성

실험은 Makino사의 V55 3축 고속 머시닝센터에 절삭력 변화 분석을 위해 공구동력계를 장착하여 그 위에 전용 지그를 장착하고 지그의 X축, Y축 방향으로 가속도계를 부착해서 가공 시 시편에 발생하는 진동을 가속도 신호로 획득하였다.

절삭력 신호는 RMS(Root mean square) 연산을 통해 평균값을 구하고 가속도 신호는 RMS 연산을 통해 시영역(Time domain) 분석을 수행하여 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 앤드밀을 사용하여 가공하였다. Fig. 2에 실험장치 구성을, Fig. 3에 실험 방법과 신호 획득 체계를, Table 1에 실험 장비 목록을 나타내었다.

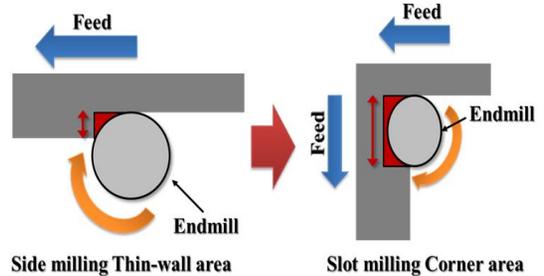


Fig. 1 Difference of milling type according to machining area

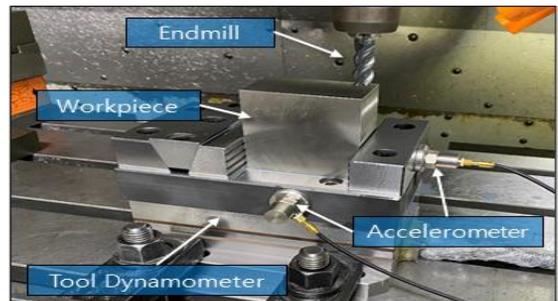


Fig. 2 Experimental setup

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 |
| Work Material | Ti-6AL-4V |

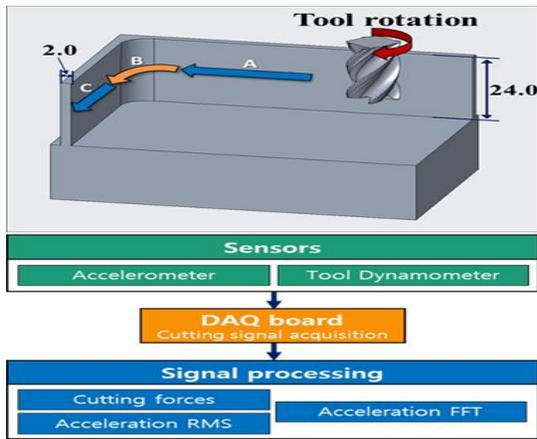


Fig. 3 Schematic diagram of experimental method

2.3 실험 방법

2.3.1 시편 준비 및 사전 가공

70x45x45(mm) 사이즈의 Ti합금(Ti-6AL-4V)을 9.0mm 두께의 L자형 형상으로 사전 가공하여 시편을 준비하고 얇은 벽 가공 실험을 수행하며 Fig. 4에 형상을 나타내었다.

2.3.2 실험 방법

가공실험은 축(ADOC)방향으로 4 스텝, 반경(RDOC)방향 3 스텝으로 나누어 가공하며 축 방향 스텝 당 6.0mm, 반경 방향 스텝은 내측 2.0, 2.0, 1.0mm로 가공하고 외측은 1.0, 1.0mm로 가공하여 최종적으로 벽두께 2.0mm, 높이 24.0mm의 L자형 얇은 벽 구조를 생성한다.

실험 1은 생산성을 위해 기존 공정에서 사용하는 직선 이송방식으로 코너부에서 공구 경로가 직각으로 이동하는 조건이며, 실험 2는 실험 1과 가공방식은 동일하지만, 절삭조건 변경을 통한 변화를 파악하는 실험으로 코너부 절입 시 절삭 부하를 줄이면서 가공시간은 동일하게 유지하기 위해 날당 이송량을 감소시키고 주축회전속도를 증가시킨 조건이다. 실험 3은 실험 1과 절삭조건은 동일하고 코너부를 원호 형태로 가공하는 조건이다. 툴 이동 방향은 코너부 가공 전 단계를 A 영역, 코너부 B 영역, 코너부 가공 후 C 영역 순으로 나누어 실험하였다. 이 실험에서 주축회전수, 이송속도, 날당 이송량 등 절삭조건은 티타늄 합금의 밀링 가공 최적화 조건^[10]을 적용하였다. Fig. 5에 최종 형상과 가공순서, 절삭조건을 나타내었다.

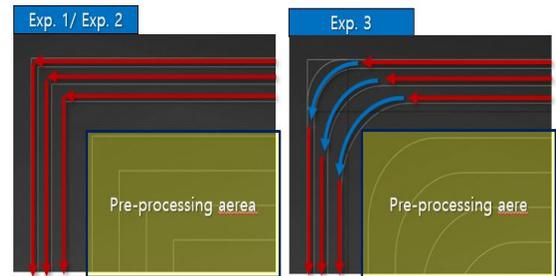
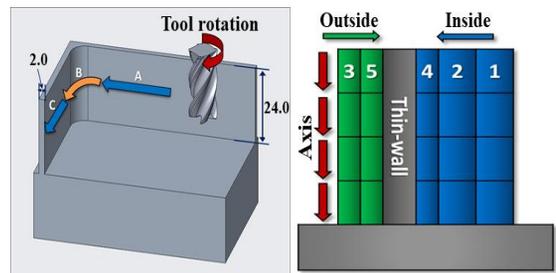


Fig. 4 Tool path of each experimental condition



| Exp Number | Spindle speed (rpm) | Feed rate (mm/tooth, mm/min) | ADOC (mm) | RDOC (mm) | Process sequence |
|------------|---------------------|------------------------------|-----------|-----------|------------------|
| 1 | 3,620 | 0.06, 870 | 6/6/6/6 | 2/2/1 | 1→2→3→4→5 |
| 2 | 5,430 | 0.04, 870 | 6/6/6/6 | 2/2/1 | 1→2→3→4→5 |
| 3 | 3,620 | 0.06, 870 | 6/6/6/6 | 2/2/1 | 1→2→3→4→5 |

Fig. 5 Experimental conditions and Process sequence

2.4 실험 결과 및 고찰

2.4.1 절삭력 및 가속도 RMS 분석

(1) 절삭력(Cutting forces)

절삭력 신호에 대해 이동평균(Moving average) 기법을 적용한 RMS 연산을 수행하여 그래프로 나타내고 결과를 분석하여 Fig. 6에 나타내었다.

실험 1에서 A 영역 가공 시 안정적이던 절삭력이 코너부인 B 영역 가공 시 급격히 증가하며 뾰족한 피크 형태로 나타났다. 실험 2 또한 B 영역 가공 시 절삭력이 매우 급격하게 증가하였다. 실험 3은 B 영역에서의 절삭력이 완만한 커브 형태로 증가하여 공구에 충격이 가장 작게 작용하였을 것으로 사료 된다.

절삭 합력의 분석 결과 B 영역 절삭력이 가장 높게 나타났고, A 영역과 C 영역의 절삭력은 큰 차이가 발생하지 않았다. B 영역의 절삭 합력을 기준으로 A 영역과 C 영역에서의 절삭력 편차를 분석하였으며 실험 1의 편차가 567N으로 가장 크게, 실험 3의 절삭력 편차가 345N으로 가장 작게 나타난 것을 Fig. 7을 통해서 알 수 있다.

(2) 가속도 RMS

이동평균 기법을 적용한 RMS 연산을 수행하여 그래프로 분석하였다. X축은 이송 방향 Y축은 반경 방향을 나타내었다.

실험 1에서 A 영역 가공 시 일정한 수치를 유지하던 가속도 RMS가 코너부인 B 영역에서 급격히 증가한 피크 형태로 나타났다.

실험 2는 A 영역 진입 시 급격히 증가하며 실험 1에 비해 높은 수치를 나타내고 실험 1과 동일하게 B 영역에서 급격히 증가하였다.

실험 3은 B 영역에서의 가속도 RMS가 완만하게 증가하며 수치가 가장 작게 나타났다. 실험 1과 2는 코너부 진입 시 급격한 절삭면적 증가로 인한 충격 진동이 크게 발생한 것으로 보이며, 실험 3은 원호 형태로 가공하여 절삭면적의 증가가 완만하여 공구 충격과 진동이 가장 작은 것으로 Fig. 8에 의해 판단된다.

A에서 B 영역 도달까지의 가속도 RMS는 실험 2에서 가장 높으며 이는 높은 주축회전수로 인해 가공영역에 상대적으로 큰 충격이 가해진 것으로

보이며 코너부인 B 영역에서의 가속도 RMS는 실험 1이 가장 높고 실험 3이 가장 낮음을 Fig. 9를 통하여 알 수 있고 이 결과는 가공표면 상태 분석 결과와 부합 하며 얇은 벽 가공에서 가장 문제 되는 진동과 코너부 부하증가 문제에서 가장 효과적인 가공조건 도출 가능할 것으로 판단된다.

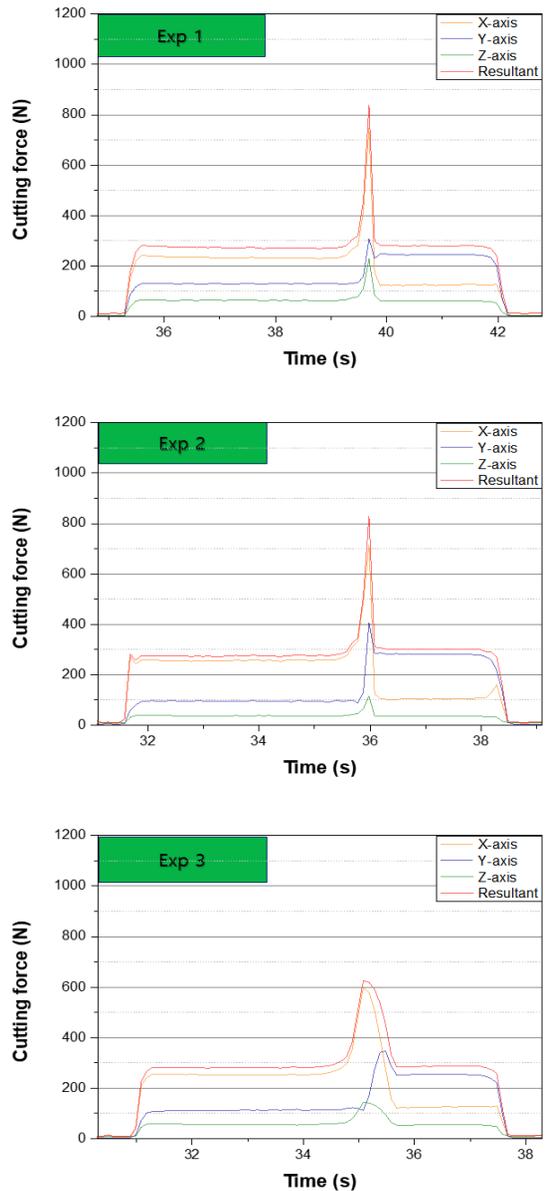
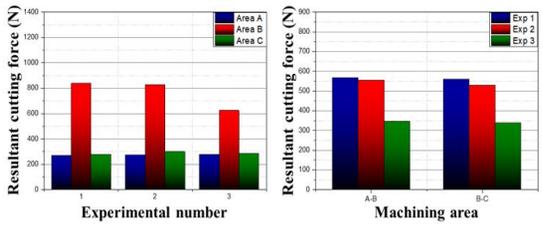


Fig. 6 Cutting force of the moving average



| Exp Number | Resultant cutting force (N) | | | Exp Number | Resultant cutting force (N) | |
|------------|-----------------------------|-----|-----|------------|-----------------------------|-----|
| | A | B | C | | A-B | B-C |
| 1 | 270 | 836 | 276 | 1 | 567 | 560 |
| 2 | 274 | 828 | 299 | 2 | 554 | 528 |
| 3 | 278 | 623 | 284 | 3 | 345 | 338 |

Fig. 7 Resultant cutting force according to machining area

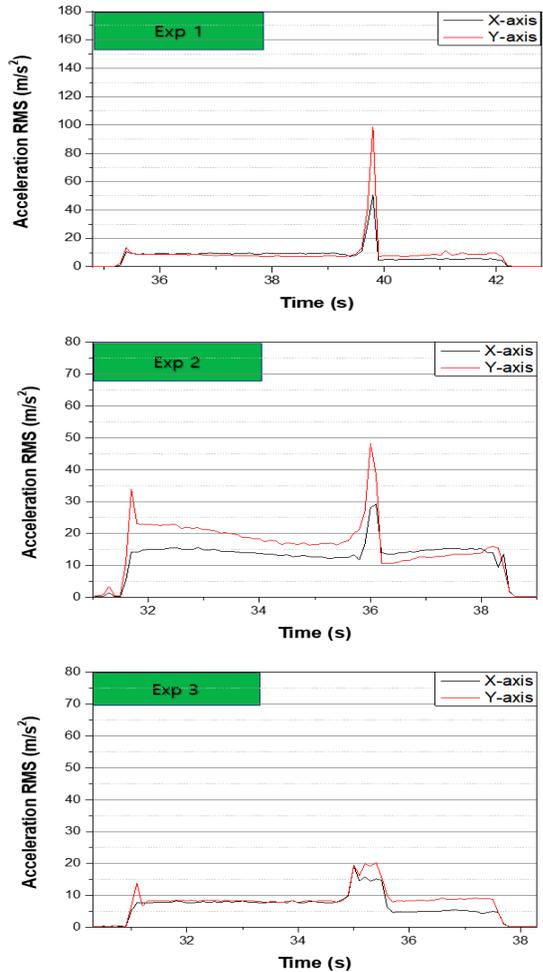
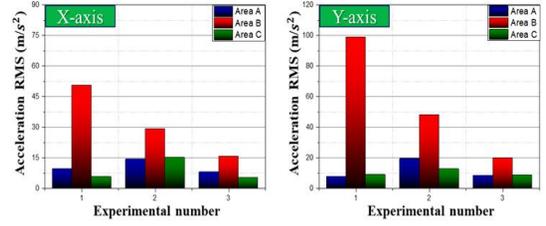


Fig. 8 Acceleration RMS of the moving average



| Exp Number | Acceleration RMS (m/s ²) | | | Exp Number | Acceleration RMS (m/s ²) | | |
|------------|--------------------------------------|------|------|------------|--------------------------------------|------|------|
| | A | B | C | | A | B | C |
| 1 | 9.7 | 50.6 | 5.7 | 1 | 7.82 | 99 | 8.95 |
| 2 | 14.4 | 29.2 | 15.2 | 2 | 19.6 | 48.2 | 12.8 |
| 3 | 8.0 | 15.8 | 5.2 | 3 | 8.4 | 19.9 | 8.7 |

Fig. 9 Acceleration RMS according to machining area

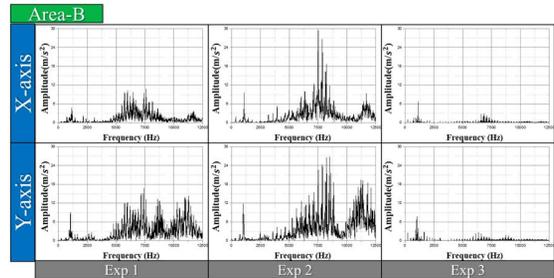


Fig. 11 FFT analysis (Area-B)

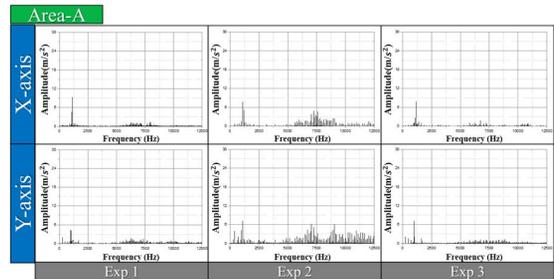


Fig. 10 FFT analysis (Area-A)

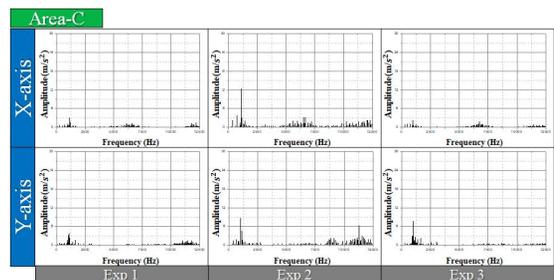


Fig. 12 FFT analysis (Area-C)

(3) FFT 분석

각 A, B, C 영역의 가속도 신호에 대한 FFT(Fast fourier transform) 분석을 하여 그래프로 나타내었다.

Fig. 10에 나타낸 A 영역은 실험 2에서 2,500Hz 이하뿐만 아니라 5,000Hz 이상의 고주파 영역의 주파수 밀도와 피크가 높게 나타나며 높은 회전속도로 인한 충격 진동이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 11에 나타낸 B 영역은 이송 방향이 급격하게 변하는 코너부 가공에서 직각 경로인 실험 1과 2는 주파수 영역에서 높은 피크 값이 나타나며 특히, 고주파 대역의 피크가 매우 높게 나타났다. 실험 3은 주파수 영역별 상당히 안정적인 형태를 나타낸다. 이는 원호 가공으로 인해 절삭면적의 급격한 증가가 발생하지 않았기 때문으로 사료 된다. Fig. 12에 나타낸 C 영역은 A 영역과 유사한 결과가 나왔고 실험 2에서 5,000Hz 이상의 고주파 영역의 주파수 밀도와 피크 수치가 높게 나타났다.

2.4.2 가공표면 상태 분석

L자형 얇은 벽 형상을 가공한 후 실험조건에 따른 표면상태를 비교 분석하였다.

Fig. 13은 A 영역을 나타낸 그림으로 실험 1은 스텝 경계부에 소재의 불완전한 절삭으로 인한 소재가 밀려있는 흔적이 관찰되었고 하단부 표면상태가 매우 불량한 것으로 파악되었다. 실험 2는 가공표면에 툴 마크가 크게 나타나며, 소재의 밀린 흔적과 함께 스텝 경계부가 선명하게 나타났다. 실험 3은 가공표면에 밀링 가공으로 인한 정상적인 툴 마크가 관찰되며, 가장 양호한 표면상태를 나타내었다.

Fig. 14는 B 영역을 나타낸 그림으로 L자형 얇은 벽의 코너부에 해당하며 가공품질과 공구수명 측면에서 중요한 가공영역이다. 실험 1은 소재의 절삭이 정상적이지 않고 소재가 밀려있는 흔적이 관찰되며, 진동에 의한 툴 마크가 선명하게 나타난다. 이는 직각 경로 가공으로 인한 코너부의 급격한 절삭면적증가에 따른 절삭력 상승에 의한 것으로 추정되며 절삭력 분석을 통해서도 확인되었다. 실험 2에서 툴 마크가 관찰 되지만 실험 1에

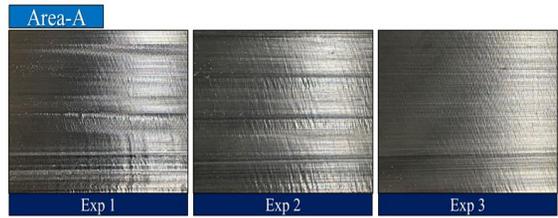


Fig. 13 Machined surface condition of Area-A

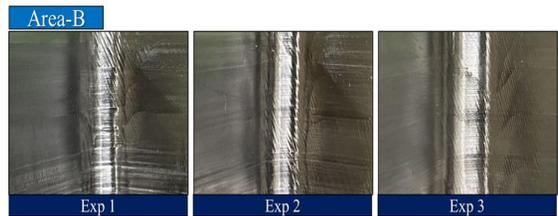


Fig. 14 Machined surface condition of Area-B

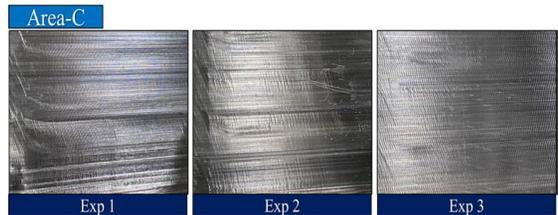


Fig. 15 Machined surface condition of Area-C

비해 상대적으로 양호한 표면상태를 나타내며, 이는 절삭속도는 증가하였으나, 날당 이송량 감소에 따라 절삭력 감소에 의한 것으로 판단된다. 실험 3은 코너부 표면상태가 가장 양호하며 이는 원호 가공에 의한 절삭력 변화가 상대적으로 작아서 코너부 가공 시 충격 및 진동이 상대적으로 작은 영향으로 사료 된다. Fig. 15는 C 영역을 나타낸 그림으로 실험1은 하단부 표면상태가 매우 불량하며 가공종료 지점에 강성 저하로 인한 탄성변형으로 비정상적인 툴 마크가 나타났다. 실험2는 가공표면에 툴 마크가 상대적으로 크게 나타나며, 소재의 밀린 흔적과 스텝 경계부가 선명하게 나타났고, 실험 3은 가공 종료부의 비정상적인 툴 마크도 가장 작게 나타나며 가공표면이 가장 양호한 상태이다.



Fig. 16 Cutting tool condition

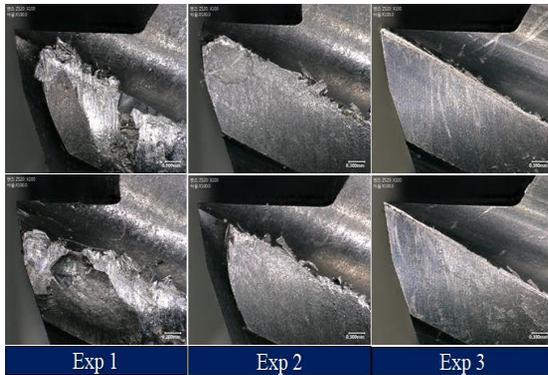


Fig. 17 Cutting edge condition

2.4.3 공구마모상태 분석

실험조건별 동일 체적을 가공한 후 공구 수명 평가를 위해 실험조건별 공구 상태를 비교하여 Fig. 16에 나타내었다.

실험 1은 엔드밀의 절삭 날에 칩이 용착되어 있으며, 절삭 날이 심각하게 파손되어 있음을 알 수 있다. 실험 2는 절삭 날에서 소재 응착이 발견되며, 일부 절삭 날의 파손이 관찰되었다. 실험 3은 절삭 날의 코팅층 박리는 관찰되었지만 칩이나 심각한 파손은 관찰되지 않고 양호한 상태를 보였다.

Fig. 17은 공구 절삭 날 끝(edge)을 나타낸 그림으로 실험 3의 경우 코너부를 원호 형태로 가공함으로써 급격한 절삭력 증가 및 충격으로 인한 절삭 날의 손상이 없었으며, 공구 수명 측면에서 가장 효과적인 가공조건임을 확인하였다.

실험 결과에 대한 종합적인 분석을 통해 실험

3이 L자형 얇은 벽 구조 가공에 가장 효과적이다. 또한, 코너부 가공품질과 공구 수명을 더욱 향상시키기 위해 정상 가공 시 최종 코너 영역은 이송량과 주축 회전속도를 낮추거나 불가피하게 직각 형태로 진입해야 제품형상에 요구하는 R 값을 맞출 수 있는 경우에는 제품 요구도 R보다 작은 엔드밀을 이용한 원호 가공을 적용하는 것에 대해 고려할 필요가 있는 것으로 사료 된다.

3. 결론

티타늄 합금의 L자형 얇은 벽 형상 가공에서 가장 문제가 되는 코너부 가공에 효과적인 가공 방법을 찾기 위해 3가지 조건으로 가공 실험을 수행하였다. 이를 위해 기존 가공 방법, 이송량은 유지하면서 날당 이송량을 감소시켜 가공하는 방법, 코너부를 원호 형태로 가공하는 방법을 적용한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 가공표면 분석의 결과, 실험 1과 실험 2에서는 코너부에 진동에 의한 툴 마크와 소재 밀림 흔적이 관찰되었으나, 실험 3의 가공표면은 정상적인 툴 마크만 관찰되는 가장 양호한 가공상태를 나타내었다.
- 2) 공구 상태 분석을 통해 실험 1은 절삭 날의 파손이 심각하게 발생하였으며, 실험 2는 소재 응착과 절삭 날 치핑이 관찰되었지만, 실험 3은 절삭날의 심각한 손상 없이 정상 마멸이 관찰되었다.
- 3) 절삭 신호분석 결과 코너부를 직각 가공하는 실험 1과 2에 비해 코너부를 원호 가공하는 실험 3은 절삭력과 가속도 RMS가 낮으면서, 직선부와 코너부에서의 차이가 가장 작다.
- 4) 가속도 신호의 FFT 분석의 결과 실험 3은 코너부 가공에서 주파수 대역별로 큰 변화가 관찰되지 않았으며, 안정적인 가공이 진행된 것으로 파악되었다.

본 연구에서 관찰된 가공표면 상태, 공구 상태, 그리고 절삭 신호에 대한 종합적인 분석을 통해 티타늄 합금의 L자형 얇은 벽 가공에서 실험 3과

같이 코너부를 원호 가공하는 것이 가공품질과 공구 수명 측면에서 가장 효과적인 방법으로 판단된다.

REFERENCES

1. Lee, Y. T., Titanium(in Korean), Iron and Steel News, 2016.
2. Kahles, J. F., Field, M., Eylon, D., & Froes, F. H., "Machining of Titanium Alloys," Jom, Vol. 37, No. 4, pp. 27-35, 1985.
3. Campa, F. J., de Lacalle, L. L., Lamikiz, A., & Sanchez, J. A., "Selection of cutting conditions for a stable milling of flexible parts with bull-nose end mills," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, pp. 279-282, 2007.
4. Bhaumik, S. K., Divakar, C., & Singh, A. K., "Machining Ti-6Al-4V alloy with a wBN-cBN composite tool," Materials & Design, Vol. 16, pp. 221-226, 1995.
5. Lee, J. H., Kim, H. Y., Yoon, H. S., "Sustainability Analysis in Titanium Alloy Machining," Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18 No. 12 pp.73-81 2019.
6. Koo, J. Y., Hwang, M. C., Lee, J. H., Kim, J. S., "Investigation of Machined-Surface Condition and Machining Deformation in High-Speed Milling of Thin-Wall Aluminum 7075-T651," Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 25 ,No. 3, pp. 211-216, 2016.
7. Bae, M. W., Jung, H., Park, H. Y., "A Study on Wear Characteristics of Cutting Tools in a Titanium Roughing Cut Machining" Transaction of KSAE, Vol. 24, No. 1, pp.67-73, 2016.
8. F Sun, S Qu, Y Pan, X Li, C Yang, "Machining performance of a grooved tool in dry machining Ti-6Al-4 V" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73, pp. 613 – 622, 2014.
9. Kim, J. M., Koo, J. Y., Kim, J. S., Jun, C. S., "Optimization of Machining Conditions in Milling of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Using the Response Surface Method." Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 10, pp. 60-67, 2019.