



## 티타늄 합금의 평엔드밀 가공 시 공구 방향에 따른 가공성 평가

박민석<sup>a</sup>, 이훈희<sup>a</sup>, 윤왕호<sup>a</sup>, 김미루<sup>a\*</sup>

## Evaluation of Cutting Performance Based on Tool Orientation during Solid Carbide End-milling of Ti-6Al-4V

Min-Suk Park<sup>a</sup>, Hoon-Hee Lee<sup>a</sup>, Wang-Ho Yun<sup>a</sup>, Mi-Ru Kim<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Dongnam Division, Korea Institute of Industrial Technology

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	2	March	2023
Revised	30	March	2023
Accepted	31	March	2023

## Keywords:

Tool orientation  
Cutting force  
Tool wear  
Surface roughness  
Titanium alloy

## ABSTRACT

Titanium alloys are classified as difficult-to-cut materials with poor machinability, leading to a continuous demand for the development of machining methods. For machining titanium alloys, various tool orientations can be employed based on the shape of the workpiece, such as the presence of an inclination angle. In this study, machining tests considering tool orientation were performed using a solid carbide end mill tool. The tool orientation was classified into three categories with inclination angles of 90° (Reference), 45° (Upward), and 135° (Downward). The machining tests indicated that the Reference orientation exhibits the longest tool life and best surface roughness. Conversely, the Upward orientation exhibited the shortest tool life, while the Downward orientation exhibited the poorest surface roughness. When considering the Upward and Downward cases, the contact length between the cutting edge and the material becomes longer due to the inclination angle during machining, which in turn affects cutting performance.

## 1. 서론

티타늄 합금은 대표적인 난삭재 중 하나로, 고온에서 강도가 우수하고 가볍고 우수한 기계적 성질을 가진다. 하지만 낮은 열 전도성으로 인해 가공이 어렵고 공구 수명이 짧아 불량률의 원인이 되는 소재이다<sup>[1-4]</sup>. 이 티타늄 합금은 항공, 국방, 의료 등 여러 고부가가치의 산업에 적용이 된다. 특히 최근 항공부품의 소재는 난삭재의 비율이 약 20%를 차지하며 비중이 점차 증가하고 있으므로 티타늄 합금의 가공 기술의 개발은 끊임없이 요구된다. 난삭재 항공부품을 예로 들면, 임펠러, 케이스 등 엔진 부품과 피팅, 프레임과 같은 기체 구조물 등 복잡한 형상의 부품이 많이 존재한다<sup>[5-7]</sup>. 이런 부품들은 주로 니켈 합금과 더불어 티타늄 합금이 많이 사용되며, 그 중

Ti-6Al-4V의 비중이 높고 밀링 공정에 의해 가공이 많이 이루어진다<sup>[8]</sup>. 밀링은 부품 표면을 가공하는 주요 방법 중 하나이며 복잡한 구조의 가공에 널리 사용된다. 밀링 공정에서는 평면에서의 단순 반복가공 뿐만 아니라 부품 형상에 따라 곡면 프로파일과 경사를 가져서 공구의 방향, 경로가 다양해지는 공정이 존재한다<sup>[9-11]</sup>. 더불어 오랫동안 많은 연구자들이 가공 소재의 각도와 공구 방향이 공구 마모 및 표면 거칠기에 미치는 영향을 조사해 왔다. D. W. LEE의 연구는 Inconel 718 소재의 45° 만큼 tilt된 가공물을 대상으로 볼노즈 엔드밀의 공구 방향에 대한 연구를 수행하였다. 공구 방향을 vertical up/downward와 horizontal up/downward 4가지로 두고 공구 수명을 비교하였으며 cutting force, surface roughness를 통해 공구 경로에 따른 가공 성능을 비교하였고 horizontal downward

\* Corresponding author. Tel.: +82-55-924-0122

E-mail address: mrkim@kitech.ac.kr (Mi-Ru Kim).

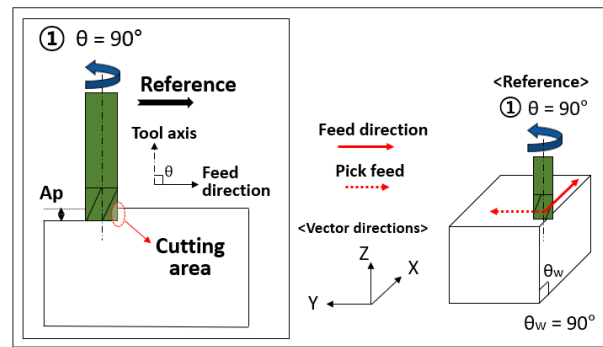
가 가장 효과적이라고 보고했다<sup>[12]</sup>. SM45C 소재를 사용하여 upward와 downward 절삭에 대하여 feed 방향과 pick feed 방향으로 볼 노즈 엔드밀 가공 실험을 한 Yoon의 연구에 의하면, pickfeed 방식이 feed 방식보다 표면 거칠기 및 가공시간 측면에서 유리하다고 보고하였고, 그 중 downward가 유리하다고 보고하였다<sup>[13]</sup>. Yao의 연구에 따르면, TC17 소재의 4종류의 curved surface를 다양한 공구 방향에 따라 볼 노즈 엔드밀 가공을 수행하고 표면 거칠기와 표면 형상, residual stress 분석을 통하여 공구 방향의 영향에 대해 연구하였다<sup>[14]</sup>. 그 외에도 유사한 연구사례가 존재한다<sup>[15-17]</sup>.

위와 같이 공구 방향(tool orientation)을 고려한 연구는 많이 수행되어 왔지만 볼 노즈 엔드밀을 대상으로 한 연구가 많았으며, hardened steel이나 Inconel 소재에 대한 연구가 대부분이었다. 주로 finishing 공정에서 공구의 방향에 따라 최적의 공구 수명과 표면 품질을 얻기 위해 볼 노즈 엔드밀 연구가 많이 수행되었지만, 황삭 공정에서도 공구의 방향성은 중요하게 고려되어야 한다. 그러나 티타늄 합금을 대상으로 한 flat roughing 가공에서 공구 방향을 고려한 연구는 찾기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 티타늄 합금의 황, 중삭에 사용되는 4-flute solid carbide flat end mill 공구를 사용하여 티타늄 합금(Ti-6Al-4V) 가공을 수행하였고, 공구의 마모와 표면 거칠기, 절삭력 분석을 통하여 feed 방향으로의 공구 방향에 대한 효과를 분석하였다.

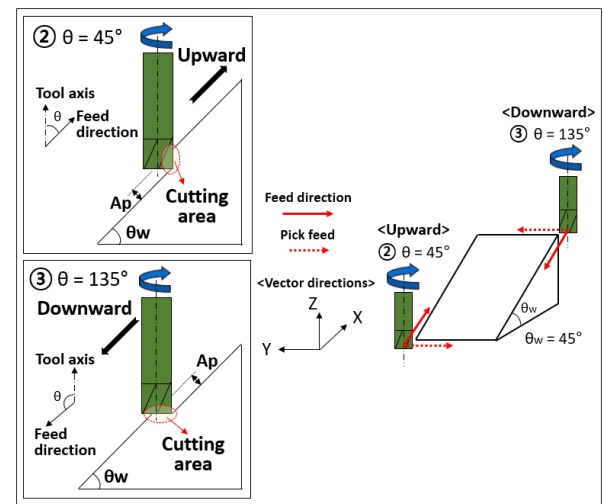
## 2. 실험 방법

### 2.1 공구 방향의 설정

Flat end mill은 황삭 또는 중삭으로 난삭재 가공에 널리 사용된다. 그리고 동일한 공구 경로에 대해 기하학적 프로파일로 인해 다양한 공구 방향을 선택할 수 있다. 본 실험의 목표는 가공에서 공구의 방향에 따라 나타나는 효과에 대해 조사하는 것으로, Fig. 1과 같이 경사 각도(inclination angle,  $\theta$ )를 변수로 두고 3가지의 공구 방향을 적용하였다. 경사 각도( $\theta$ )는 평면 가공을 기준으로  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ 로 나누었으며, 3가지의 다른 공구 방향에 대해 가공 시작 지점, feed 방향, 주축 회전 방향을 보여준다. Fig. 1(a)는 공구의 방향에 따른 특성에서 기준이 되는 reference cutting ( $\theta=90^\circ$ ) 경로를 나타내며 'reference'로 명명하였다. Fig. 2(b)는 공구의 방향은 feed 방향에 따라 upward cutting( $\theta=45^\circ$ ) 경로와 downward cutting( $\theta=135^\circ$ ) 경로로 구성하였고, 각각 'upward'와 'downward'로 명명하였다. upward와 downward에서는 경사 각도의 설정을 위해 가공 소재에 angle ( $\theta_w$ ) 을  $45^\circ$  만큼 갖도록 세팅하였다. 또한 Fig. 1은 공구의 방향에 따라 가공을 할 때 공구와 소재가 접촉되는 main cutting area의 contact position을 묘사한다. Reference의 경우 flat 엔드밀 가공에 대해 널리 알려진 것과



(a) Reference cutting (inclination angle,  $\theta = 90^\circ$ )



(b) Upward & downward cutting (inclination angle,  $\theta = 45^\circ, 135^\circ$ )

**Fig. 1 Schematic of the tool orientation according to inclination angle: reference, upward and downward**

같이, main cutting area는 side edge part에서 지배적인 가공이 이루어진다(see Fig. 1(a)). 그러나 reference와 달리 공구의 방향이 달라지면 주 절삭 접촉 위치에 영향을 미친다. Feed 방향으로의 upward의 경우 절삭 날이 아래에서 위로 올라가면서 가공이 이루어지므로, 소재와 공구의 날이 맞닿는 주 절삭 부위는 reference와 마찬가지로 side edge part가 지배적이게 된다(see Fig. 1(b)). 반대로 downward의 경우 절삭 날이 위에서 아래로 내려가면서 가공이 이루어지므로, side edge part 보다는 bottom edge part가 지배적인 절삭 부위가 된다(see Fig. 1(b)).

D. W. LEE의 연구에서<sup>[12]</sup>, 볼 노즈 엔드밀도 공구 방향에 따라 Tool axis 기준으로 공구-소재가 접촉하는 부분이 달라진다고 언급하였다. Upward일 때는 큰 각, downward일 때는 작은 각에서 가공이 일어난다. 이와 유사하게 flat 엔드밀에서도 비슷한 상황이 발생하며, 공구의 방향에 따라 각 가공 위치에 맞는 날에서 마모가 측정되어야 한다. 따라서 공구의 마모를 관찰할 경우, 각각 공구의 방향에 따라 가공에 지배적인 절삭 날 부위를 측정할 필요가 있다.

**Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V (wt%)**

Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
Bal.	6.14	4.15	0.15	0.018	0.008	0.001	0.17

**Table 2 Mechanical and physical properties of Ti-6Al-4V**

Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
969	891	15	31

## 2.2 실험 장치 구성

본 가공 테스트에서 사용된 피삭재는 티타늄 합금 중 Ti-6Al-4V 블록(135×100×100 mm, AMS 4911)으로 chemical composition and mechanical and physical properties는 Table 1과 Table 2와 같다.

가공 테스트는 직경 12 mm, 나선 각도 38°, 모서리 반경 0.5 mm 및 4날 solid carbide flat end mill 공구를 사용하여 수행되었다. 테스트에 사용된 공작 기계는 스펀들 속도 최대 12,000 rpm, 최대 출력 29 kW의 5축 CNC 머시닝 센터이다 (DMU 60, DMG-Mori). Ti-6Al-4V 블록을 가공할 때 공구 방향에 대한 효과를 분석하기 위한 측정 인자는 공구 수명(tool life), 절삭력(cutting forces), 표면 거칠기(surface roughness) 이다.

Fig. 2는 실험 장치의 모습을 보여주고 있으며, cutting force 측정(Fx, Fy and Fz)은 Kistler 3-component dynamometer (Type 9257A)를 사용하였다. 공구동력계는 Sampling rate 3 kHz의 조건으로 앰프(Kistler, 5070A)와 NI DAQ 보드(cDAQ-9147)에 연결하였다. 가공 소재의 feed 방향 및 pick feed 방향에

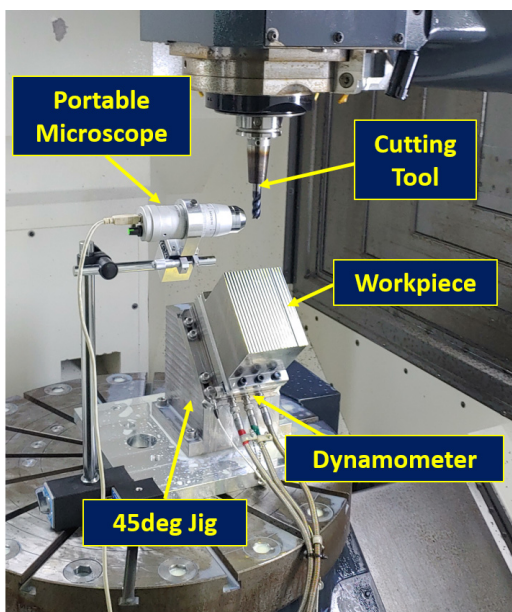


Fig. 2 Experimental set-up for machining test

따른 표면 거칠기(Ra)는 휴대용 표면 거칠기 시험기(Mitutoyo, SJ301)를 사용하여 측정되며, sampling length는 0.8 mm, evaluation length는 4.8 mm이며 반복 3회 측정을 평균하여 데이터를 획득하였다. 공구 마모 및 표면 형태는 각각 휴대용 광학 현미경(×100 lens)으로 측정하였다.

## 2.3 실험 조건 및 방법

가공 조건 설정 시, D. W. Lee<sup>[12]</sup>의 연구에 따르면 볼 노즈 엔드밀의 경우 공구 방향에 따른 볼의 접촉 지점에 따라 절삭속도가 변하므로 가공 조건이 변하나, flat 엔드밀의 경우 접촉 위치에 따른 가공속도 변화의 영향이 거의 없으므로, 가공속도에 대한 조건은 동일하게 설정하였다. 가공속도(Vc)는 90 m/min, feed/tooth (fz)는 0.1 이며, 가공실험의 조건은 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서의 가공은 모두 down milling으로 이루어졌으며, 가공 시작 분석 대상의 측정은 절삭력의 경우 135 mm의 블록 가공을 연속적으로 하는 동안 연속적으로 측정되었다. 공구 마모는 가공 길이 540 mm 간격으로 maximum flank wear(VBmax)가 측정되었으며, 공구가 파손될 때까지 측정되었다<sup>[18-19]</sup>. 모든 표면 거칠기 측정은 마찬가지로 540 mm의 가공 길이 간격으로 feed direction과 pick feed direction에서 측정되었다. 측정 parameter에 따른 가변성을 최소화하기 위해 각 공구 방향의 가공 테스트를 3번 수행하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 공구 마모(tool wear)

가공 테스트는 공구 방향에 따라 3가지 종류로 수행되었으며, Fig. 3은 flat 엔드밀 공구에서 공구 마모 분석을 위한 마모 측정 위치를 나타낸다. 공구 마모 측정은 광학 현미경에 의해 side edge part (major edge)와 bottom edge part (end cutting edge), rake face로 3가지 위치에서 측정되었다<sup>[20]</sup>.

Fig. 4는 major edge와 end cutting edge의 flank face에서 new tool의 모습을 보여주며, 코팅이 잘 되어있는 절삭 날의 모습이다.

Fig. 5는 공구 마모가 적절히 진행되었을 때 나타나는 각 공구 방향별 tool wear를 나타낸다. Fig. 5(a)는 5,940 mm 가공 이후

**Table 3 Conditions of machining test**

N (RPM)	2388
Feedrate (mm/min)	960
Radial depth of cut (mm)	5
Axial depth of cut (mm)	1

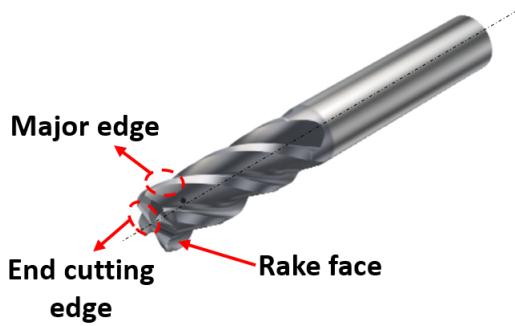
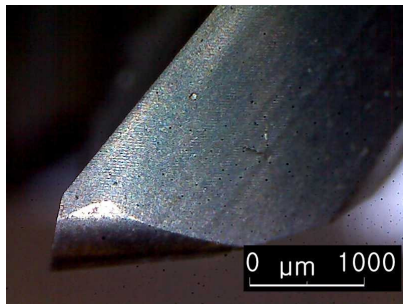
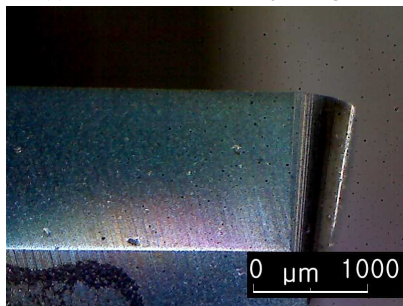


Fig. 3 Measurement area in geometry of endmill tool



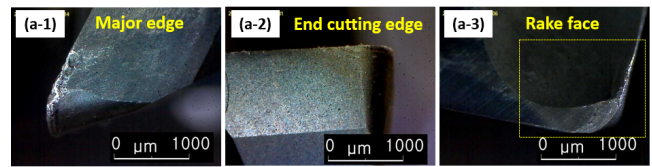
(a) Flank surface in major edge



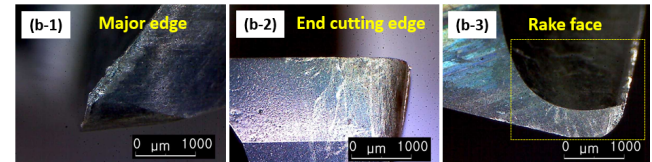
(b) Flank surface in end cutting edge

Fig. 4 Microscope images of new tool in flank face

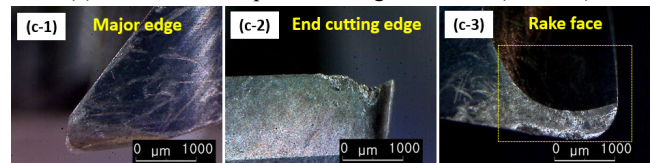
reference의 공구 방향에서 나타나는 공구 마모의 모습을 나타낸다. Fig. 5(a)의 rake face와 major edge, end cutting edge에서 확인할 수 있듯이, Major edge에서 날 마모가 주로 진행되었으며, end cutting edge에서는 마모가 거의 발생하지 않았다. 이는 주 가공 위치가 major edge에서 발생한다는 것을 의미한다. Major edge에서는 마모가 진행될수록 코팅이 벗겨지고 가공 소재와 공구 간의 마모가 점진적으로 진행되었으며 Ti-6Al-4V 소재의 adhesion이 빈번히 발생하였다. 반면에 end cutting edge는 마모의 모습은 거의 찾아볼 수가 없으며 이송에 의해 약간의 스크래치가 발생하였다. Rake face를 보면, major edge 부위에서는 날 손상이 관찰되는 반면 end cutting edge에서는 날 손상이 거의 관찰되지 않았다. 따라서 reference에서 end cutting edge에서는 제대로 된 공구 마모를 측정하기가 어려우며, flank wear는 기준에 잘 알려진 것처럼 major edge area에서 측정되었다.



(a) Tool wear of reference cutting, 5940 mm ( $\theta = 90^\circ$ )



(b) Tool wear of upward cutting, 2700 mm ( $\theta = 45^\circ$ )



(c) Tool wear of downward cutting, 3780 mm ( $\theta = 135^\circ$ )

Fig. 5 Microscope images of tool wear according to tool orientation: after each cutting length

Fig. 5(b)는 2,700 mm 가공 이후 upward의 공구 방향에서 나타나는 공구 마모의 모습을 나타낸다. Reference와 유사하게, Fig. 5(b)에서 확인할 수 있듯이 end cutting edge는 어느 정도 유지하면서 major edge area에서 날 마모가 심하게 진행됐으며 공구의 코팅이 벗겨지는 현상이 발생하면서 파손 직전의 상태를 보인다. End cutting edge에서는 major edge에 비해 마모가 거의 발생하지 않았으며 마모 발생 보다는 경사 각도(inclination angle)에 의해 end cutting edge가 소재와 접촉하는 길이가 길어지면서 다량의 스크래치와 날 끝의 코팅이 벗겨진 것으로 보인다. 이 현상은 rake face에서 알 수 있는데, major edge 부위에서는 빠른 가공속도에 의해 chipping 및 가공소재의 adhesion이 관찰되는 반면 end cutting edge에서는 마모의 모습이 거의 관찰되지 않았다. 따라서 upward에서도 end cutting edge에서는 tool wear의 변화를 관찰하기 어려웠으며 flank wear는 major edge area에서 측정되었다.

Fig. 5(c)는 3,780 mm 가공 이후 downward의 공구 방향에서 나타나는 공구 마모의 모습을 나타낸다. Upward와는 반대로 downward cutting은 end cutting edge에서 마모와 날 파손이 점진적으로 이루어졌으며, major edge에서는 가공 소재와의 마찰에 의한 공구 코팅의 스크래치 외에 큰 마모 현상이 발생되지 않았다. 가공이 경사 각도( $\theta$ )에 따라 아래 방향으로 이동하면서 이루어지므로 소재와 공구의 end cutting edge에 접촉 부분이 길어지고 부하가 많이 발생한다. 이는 Rake face에서의 모습을 보면 알 수 있듯이, major edge 부위는 3,780 mm만큼 가공이 진행되어도 날 손상이 거의 없는 반면 end cutting edge에서는 날 마모가 많이

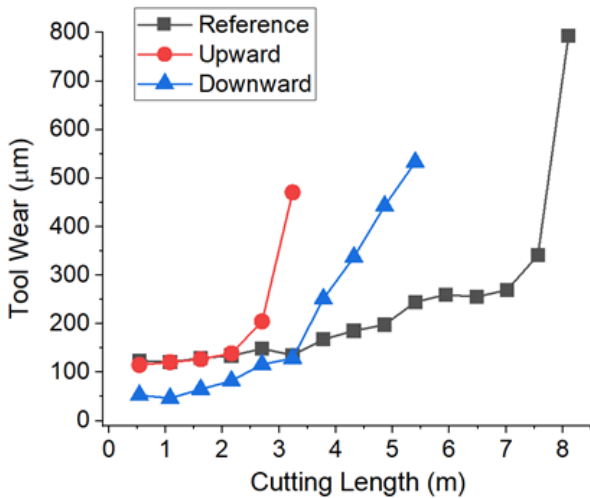


Fig. 6 Tool wear according to tool orientation on cutting length

발생한 것을 볼 수 있다. 따라서 downward에서 tool wear의 분석은 major edge 보다 end cutting edge에서 이루어져야 한다.

Fig. 6은 각 공구 방향에 대해서 공구 파손 직전까지의 가공 길이에 따른 flank wear 측정 결과를 나타낸다. Fig. 5에서 나타난 것과 같이 reference와 upward는 major edge에서의 flank wear 측정 결과를 나타내며, downward에서는 end cutting edge에서의 측정 결과를 나타낸다. 공구의 수명은 가공 표면의 거칠기도 함께 고려되어야 하나, 단순 파손 시점을 기준으로는 공구의 수명은 reference에서 가장 좋은 모습을 보여줬으며, upward에서 가장 짧은 모습을 나타냈다. Reference와 upward는 동일한 위치의 edge를 측정하였으므로 가공 초기에는 공구 마모가 유사하나, reference의 마모는 조금씩 점진적으로 마모가 이루어진 후 가공 길이 약 7 m 이후 공구가 파손되었으며, upward의 경우 가공 길이가 2.5 m가 넘어가면서부터 공구의 마모가 급격히 증가한 뒤 파손되었다. 이는 공구 방향과 경사 각도( $\theta$ )에 의해서 절삭 날이 가공 소재와 접촉하는 길이가 더 길어지고 공구를 반경 방향으로 더 부하를 강하게 가하기 때문에 공구의 마모가 빠르게 진행된 것으로 보인다. Downward의 경우 측정 위치가 end cutting edge에서 이루어지므로 가공 초기 공구 마모는 나머지 공구 방향의 마모에 비해 낮으나, 점진적으로 마모가 진행되었으며 약 4 m 이후에서 파손이 발생하였다. Downward의 경우 upward와는 반대로 가공시 부하가 공구의 아래 부분(end cutting edge position)에서 발생하므로 반경 방향 보다 축 방향으로의 부하의 지지가 이루어지므로 upward에 비해 공구의 수명이 긴 것으로 분석할 수 있다.

Tool wear 분석 시 측정하는 edge가 다르고 마모 진행 속도가 다르기 때문에 reference, upward와 downward 간의 직접적인 마모 비교가 어렵지만, 이와 같이 같은 공구의 방향에 따라 공구의 수명 및 공구 마모의 메커니즘이 달라지는 것을 알 수 있었다.

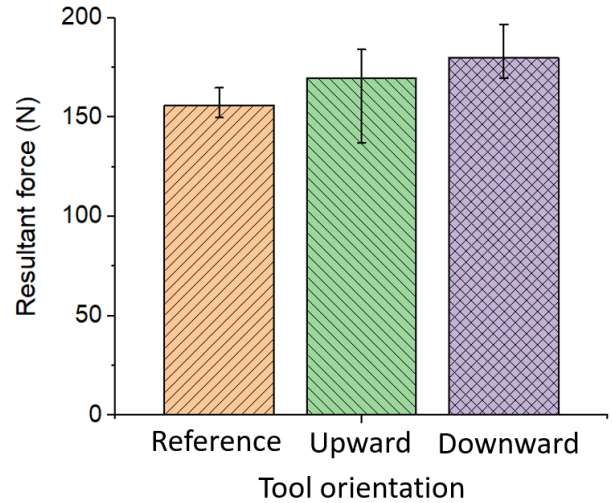


Fig. 7 Initial cutting forces measured with different tool orientation

### 3.2 절삭력(cutting force)

Fig. 7와 Fig. 8은 공구 방향에 따라 나타나는 resultant cutting force를 보여준다.

Fig. 7의 결과는 새 공구(초기 절삭)를 사용하였을 때 나타나는 절삭력 결과이다. 공구 방향에 따른 initial resultant force는 reference가 가장 작게 나타났고, 큰 차이는 아니지만 downward가 가장 큰 절삭력을 가졌다. Upward와 downward는 경사 각도 때문에 공구 날과 소재 간의 접촉 길이가 길어지므로, 가공 초기에는 reference cutting보다 큰 힘을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에서 cutting length에 따라 나타나는 resultant force를 나타내었는데, 공구 방향에 따라 절삭 부하의 경향이 다르게 나타난다. 전체 경향은 Fig. 7와 유사하게 나타나며, 여기서 upward의 공구 파손 시점을 제외하면 downward에서 전반적으로 가장 큰

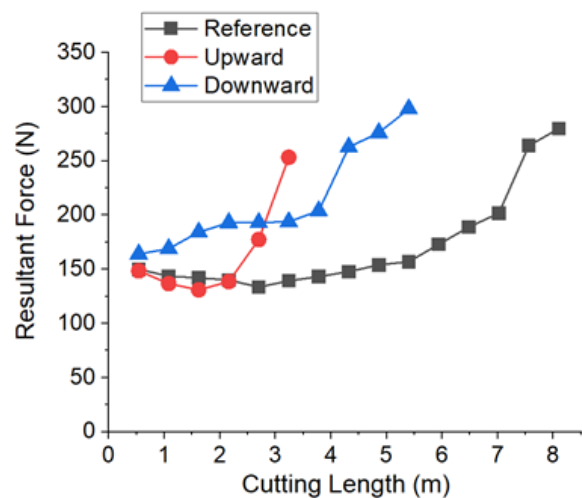


Fig. 8 Cutting force measured with different tool orientation on cutting length

힘을 갖는 것을 관찰할 수 있다. 공구 마모는 downward가 upward보다 낮게 나타나나, 절삭력은 upward보다 크게 나타나는데, 이는 downward가 경사 각도를 가지면서 end cutting edge의 가공에 의해 축(axial) 방향으로 부하가 많이 발생하기 때문에 전체 합력이 크게 측정된 것으로 보인다.

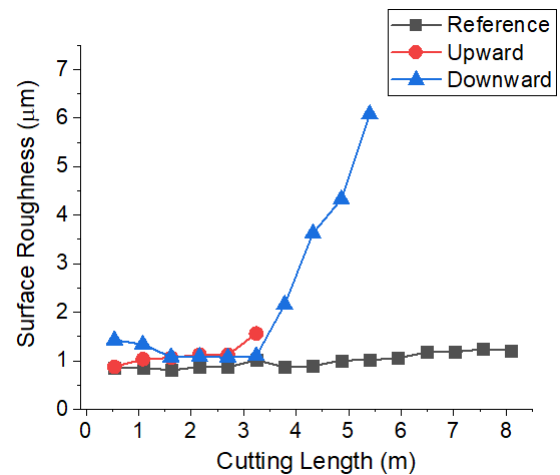
Upward는 일부 안정적인 공구 마모 영역(2 m 이내) 구간에서는 작은 차이로 가장 낮은 절삭력을 보여주지만, 빠른 공구 마모 때문에 약 2 m 이후로 절삭력이 급격하게 증가하는 모습을 보이며, reference와 함께 Fig. 6의 공구 마모의 경향과 유사한 모습을 보인다.

### 3.3 Surface roughness & Surface morphology

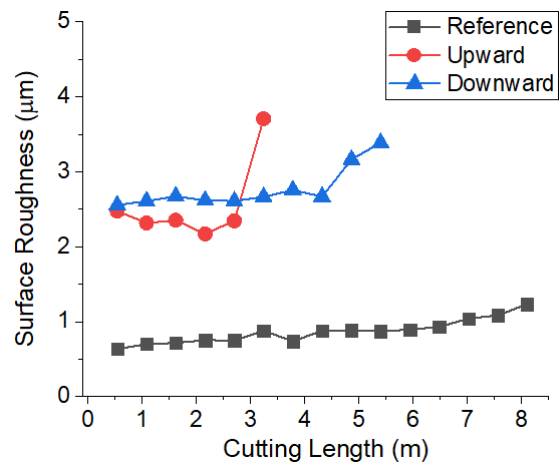
Flat end mill의 Ti-6Al-4V 가공 시 나타나는 표면 거칠기(Ra)에 대하여 공구 방향의 효과를 Fig. 9에 나타내었다. 표면 거칠기 측정 데이터는 각각 공구 방향에 따라 540 mm의 가공 길이마다 측정되었다.

Fig. 9(a)는 Feed 방향(x-axis)으로 표면 거칠기(Ra-x)를 측정하였고, Fig. 9(b)는 pick-feed 방향(y-axis)으로 측정(Ra-y)되었다. 방향에 관계없이 전반적으로 downward 공구 방향에서 표면 거칠기가 가장 높게 측정되었으며, 공구 마모가 심한 부분을 제외하면 downward에 비해 upward 공구 방향이 조금 더 낮게 측정되었다. 그리고 reference 방향이 가장 표면 거칠기가 낮게 나타났다. 먼저 feed 방향의 표면 거칠기 측정 결과를 보면(Fig. 9(a)) 가공 길이 2 m 아래에서는 downward에서 표면 거칠기가 높지만, upward의 공구 마모가 진행되면서 표면 거칠기가 유사하다가 3 m 이후로는 downward와 upward 모두 표면 거칠기가 급격하게 증가하는 모습을 보인다. 이 현상은 Fig. 6의 공구의 수명과 Fig. 8의 절삭력의 경향이 표면 거칠기의 경향과 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Pick feed 방향의 측정 결과에서는(Fig. 9(b)) upward가 공구 파손 위치를 제외하면 downward보다 표면 거칠기가 명확하게 낮게 나타나나, feed 방향과는 다르게 upward와 downward 모두 경사 각도( $\theta$ )로 인하여 표면 거칠기가 2  $\mu\text{m}$  보다 큰 거친 표면을 가진다. 그리고 마찬가지로 reference가 가장 낮은 표면 거칠기를 가진다. Fig. 9(a)와 (b)와 같이 feed 방향에 관계없이 downward 공구 방향에서 가장 불량한 표면 거칠기를 가지는 것에 대한 이유는, 공구 수명이 다하기 전까지는 major edge가 end cutting edge보다 표면에 더 샤프한 가공에 더 큰 영향을 미친 것으로 보이며, 또한 공구에 작용하는 높은 절삭력으로 인한 end cutting edge의 마모의 결과로 볼 수 있다.

Fig. 10에서는 가공이 진행되었을 때 표면의 모습을 보여준다. Fig. 10(a)는 540 mm 가공 이후 각 공구 방향에 따른 표면을 보여준다. 이는 날 마모가 크게 진행되기 전 가공 초기의 표면 형상



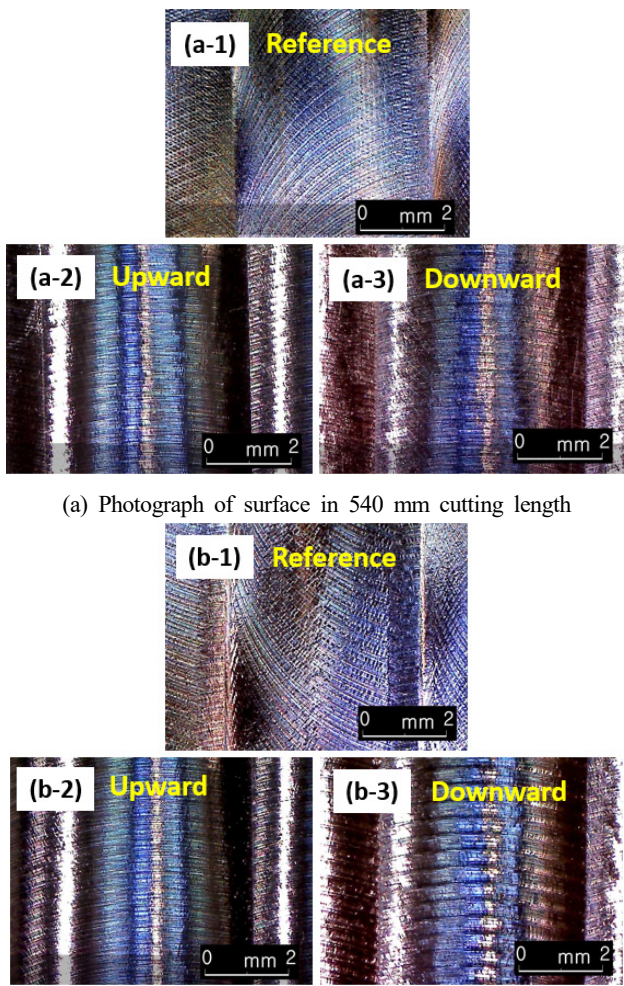
(a) Surface roughness in pick feed direction (Ra-x)



(b) Surface roughness in pick feed direction (Ra-y)

Fig. 9 Results of surface roughness of workpiece according to tool orientation

으로, upward와 downward는 경사 각도( $\theta$ )로 인해 절삭 날이 소재와 접촉하는 부분이 reference와는 다르기 때문에 표면의 형상에서도 절삭 표면이 다르게 나타난다. Fig. 9에서와 같이 표면 거칠기가 표면 형상에도 경향이 반영이 되나, 표면 형상은 전체적으로 정상적인 밀링 가공의 흔적을 나타낸다. Fig. 10(b)는 Fig. 5에서와 같이 공구 파손에 다다른 시점인 5,940 mm 가공 이후 reference, 2,700 mm 가공 이후 upward, 3,780 mm 가공 이후 downward에서 나타나는 표면의 모습을 나타낸다. Fig. 9과 비교해 볼 때, reference는 공구 마모에 따라 약간 거칠어진 표면의 모습을 보여주며, upward는 가공 초기 표면과 유사한 모습을 나타낸다. Reference와 upward는 공구가 파손되기 전까지 안정적인 표면을 유지하는 것을 알 수 있다. 하지만 downward의 경우 공구의 마모가 크게 진행될 경우 Fig. 10(b)와 같이 거친 표면을 보여주며, 이는 높은 표면 거칠기의 결과에서도 동일하



(a) Photograph of surface in 540 mm cutting length

(b) Photograph of surface in each cutting length (5940, 2700, 3780 mm)

Fig. 10 Photograph of machined surface according to tool orientation

게 나타난다.

### 3.4 Discussion

Fig. 11은 가공 시 공구 방향에 따라서 절삭 날과 소재가 접촉할 때의 개념도를 나타낸다. Fig. 11에서 나타나는 것과 같이 Fig. 9에서 reference ( $\theta=90^\circ$ )의 표면 거칠기가 가장 낮은 이유는, 특히 Ra-Y에서는 upward ( $\theta=45^\circ$ )와 downward ( $\theta=135^\circ$ )에 비해 현저히 낮은 모습을 보여주는데, 이는 reference보다 기본적으로 upward와 downward가 가공 시 경사 각도로 인해 가공 소재와 날 접촉 부위가 길어지며 (see Fig. 5), 날 끝단이 소재와 접촉되면서 표면의 산과 골이 더 크게 형성된다. 반대로 reference는 산과 골이 작게 형성되며, 표면의 품질에 영향을 미친 것으로 보인다. 또한, 절삭력의 차이는 크지 않더라도 공구 경사 각도로 인해 가공 소재와 접촉이 일어나는 길이가 길어지므로, 위와 비슷한 원리로 가공 부하가 증가하며 Fig. 6 및 Fig. 8과 같이 공구 마모 대비

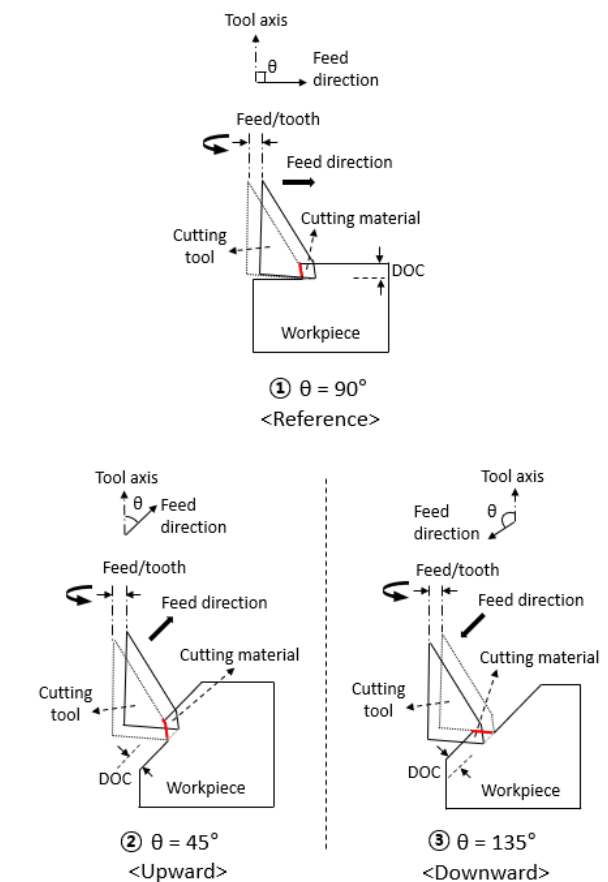


Fig. 11 Schematic of cutting between tool and workpiece according to tool orientation

downward에서 가장 절삭력이 크고, upward의 공구 방향에서는 공구 마모와 절삭력 증가가 매우 빠르게 발생한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 4날 초경 flat solid endmill 공구를 사용하여 가공 시 공구의 방향을 3가지로 나누고, 동일 조건에서 티타늄 합금 (Ti-6Al-4V) 가공을 통하여 공구 방향의 효과에 대한 분석을 수행하였다.

그 결과로, 마모가 진행된 상태에서 공구의 광학 현미경 측정을 통해, upward와 reference와는 달리 downward 공구 방향에서는 major edge가 아닌 end cutting edge에서 주로 가공이 되며 마모가 발생한다. 즉, 공구 방향에 따라 edge에서 마모의 진행이 다르게 나타난다.

공구의 수명은 reference에서 가장 길게 나타났고 upward에서 가장 짧게 나타났다. 표면 거칠기와 비교해 본 결과 upward의 가공이 가능한 길이는 약 < 2.7 m이고 reference의 가공이 가능한 길이는 약 < 7 m이다. Downward의 경우 안정적인 가공이 가능한

길이는 약 < 3.8 m 이나 표면 거칠기를 고려했을 경우 가공 길이는 약 < 3.3 m 이 바람직해 보인다.

절삭력은 downward가 가장 크게 나타났으며 축 방향으로의 부하 발생이 원인으로 보인다. 또한 공구 마모, 절삭력, 표면 거칠기 결과는 대부분 유사한 경향을 가진다.

표면 거칠기는 reference 공구 방향이 가장 낮게 측정되었으며, downward 공구 방향이 가장 크게 나타났다. Upward와 downward는 가공 시 경사 각도로 인해 절삭 날과 소재의 접촉 길이가 길어지며, 이는 공구의 수명과 표면 거칠기에 영향을 미친다.

가공 시 특별한 경우의 형상이 아니라면 reference 공구 방향과 같이 일반 평면의 가공이 가장 유리한 것으로 보이나, 부득이하게 공구의 방향이 발생하는 가공의 경우 공구 수명이 짧더라도 낮은 절삭력과 낮은 표면 거칠기를 가지는 안정적인 upward가 좋아 보이며, 표면 품질보다는 공구의 수명이 중요하다면 공구 파손 시점이 긴 downward도 바람직해 보인다.

## 후 기


이 연구는 한국생산기술연구원 기관주요사업 “현장설비 부착형 극저온 통합가공시스템 개발(4/4) (kitech EH-23-0011)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

## References

- [1] Bibeye Jahaziel, R., Krishnaraj, V., Geetha Priyadarshini, B., 2022, Investigation on Influence of Micro-textured Tool in Machining of Ti-6Al-4V Alloy, *J. Mech. Sci. Technol.*, 36:4 1987-1995, <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0334-0>.
- [2] Ha, S. J., Lim, D. W., Kim, J. H., Park, J. Y., Song, K. H., 2021, Economic Evaluation and Machining Performance in Ti-6Al-4V Titanium Alloy Milling by Integrated CO<sub>2</sub> & MQL Injection System, *J. Mech. Sci. Technol.*, 35:9 4135-4142, <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0825-4>.
- [3] Lee, J. H., Kim, H. Y., Yoon, H. S., 2019, Sustainability Analysis in Titanium Alloy Machining, *J. Korean Soc. Manuf. Proc. Eng.*, 18:12 73-81, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2019.18.12.073>.
- [4] Sadik, M. I., Isakson, S., Malakizadi, A., Nyborg, L., 2016, Influence of Coolant Flow Rate on Tool Life and Wear Development in Cryogenic and Wet Milling of Ti-6Al-4V, *Procedia CIRP*, 46 91-94, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.014>.
- [5] Serra, D., 2008, Superplastic Forming Applications on Aero Engines, A review of ITP Manufacturing Processes, In *EuroSPF08*, 1-10.
- [6] Möhring, H. C., Wiederkehr, P., 2016, Intelligent Fixtures for High Performance Machining, *Procedia CIRP*, 46 383-390, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.042>.
- [7] Koo, J. Y., Kim, D. G., Kang, I. S., Jung, Y. C., Kim, Y. H., 2020, Effect of Entering Angle on Notch Wear of Insert in the Turning Process of Inconel 718, *J. Korean Soc. Manuf. Tech. Eng.*, 29:6 489-496, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.6.489>.
- [8] Thomas, M., Murray, S., Furrer, D., 2010, Introducing New Materials into Aero Engines-Risks and Rewards, A Users Perspective, *Superalloy 718 and Derivatives*, 3-11, <https://doi.org/10.1002/9781118495223.ch1>.
- [9] M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H., Kappmeyer, G., Serafettin, E., Sim, W. M., 2015, High Performance Cutting of Advanced Aerospace Alloys and Composite Materials, *CIRP Annals*, 64:2 557-580, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.002>.
- [10] Fu, Y., Gao, H., Wang, X., Guo, D., 2017, Machining the Integral Impeller and Blisk of Aero-engines: A Review of Surface Finishing and Strengthening Technologies, *Chinese J. Mech. Eng.*, 30:3 528-543, <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0123-3>.
- [11] Zhu, L., Liu, B., Wang, X., Xu, Z., 2016, Research on Cutting Force of Turn-milling based on Thin-walled blade, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2016 2638261, <https://doi.org/10.1155/2016/2638261>.
- [12] Ng, E. G., Lee, D. W., Dewes, R. C., Aspinwall, D. K., 2000, Experimental Evaluation of Cutter Orientation When Ball Nose End Milling Inconel 718<sup>TM</sup>, *J. Manuf. Process.*, 2:2 108-115, [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(00\)70018-1](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(00)70018-1).
- [13] Yun, I. W., Hwang, J. D., 2020, Surface Quality Improvements on the Spherical Shaped Mold using Ball End Milling, *J. Korean Soc. Manuf. Proc. Eng.*, 19:3 71-76, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.03.071>.
- [14] Yao, C., Tan, L., Yang, P., Zhang, D., 2018, Effects of Tool Orientation and Surface Curvature on Surface Integrity in Ball End Milling of TC17, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 94 1699-1710, <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0523-7>.
- [15] Schulz, H., Hock, St., 1995, High-speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology, *CIRP Annals*,



- 44:1 35-38, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62270-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62270-7).
- [16] Chu, C. N., Kim, S. Y., Lee, J. M., Kim, B. H., 1997, Feed-rate Optimization of Ball End Milling Considering Local Shape Features, *CIRP Annals*, 46:1 433-436, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60859-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60859-2).
- [17] Fard, M. J. B., Bordatchev, E. V., 2013, Experimental Study of the Effect of Tool Orientation in Five-axis Micro-milling of Brass using Ball-end Mills, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 67 1079-1089, <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4549-6>.
- [18] ISO, 1989, Tool Life Testing in Milling — Part 2: End Milling, ISO 8688-2:1989, Geneva.
- [19] Kepczak, N., Zgorniak, P., Lajmert, P., Rosik, R., Sikora, M., 2020, Influence of Machining Parameters on the Polymer Concrete Milling Process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 106:7 3017-3032, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04811-x>.
- [20] O'Hara, J., Fang, F., 2019, Advances in Micro Cutting Tool Design and Fabrication, *Int. J. Extreme Manuf.*, 1 032003, <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab3e7f>.

	<p><b>Min-Suk Park</b> Ph.D. Student in the Precision Mechanical Process and Control R&amp;D Group, Dongnam Division, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Machining Process. E-mail: msparker8@kitech.re.kr</p>
	<p><b>Hoon-Hee Lee</b> Senior Researcher in the Precision Mechanical Process and Control R&amp;D Group, Dongnam Division, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Machine Tool Metrology. E-mail: hhlee84@kitech.re.kr</p>
	<p><b>Wang-Ho Yun</b> Researcher in the Precision Mechanical Process and Control R&amp;D Group, Dongnam Division, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Machining Process. E-mail: whyun@kitech.re.kr</p>
	<p><b>Mi-Ru Kim</b> Senior Researcher in the Precision Mechanical Process and Control R&amp;D Group, Dongnam Division, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Process Monitoring. E-mail: mrkim@kitech.re.kr</p>