

# 항공용 티타늄 합금 가공 공정의 지속가능성 평가

이진혁\*, 김호영\*, 윤해성\*.#

\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

## Sustainability Analysis in Titanium Alloy Machining

Jin-Hyeok Lee\*, Ho-Yung Kim\*, Hae-Sung Yoon\*.#

\*Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

(Received 23 September 2019; received in revised form 27 September 2019; accepted 9 October 2019)

### ABSTRACT

Titanium alloys have been spotlighted in numerous industries owing to their superior mechanical properties, such as high specific strength. However, the high heat and wear resistance of titanium alloys also lower their machinability and limit the wider application of the material. Many researchers have investigated the processing of titanium alloys, and it is required to evaluate the effectiveness and efficiency of developed technologies. From this perspective, this research studied sustainability in titanium alloy machining. The power consumption of the machine was measured during the process and analyzed in terms of process parameters and individual machine components. Here, an end mill specially designed for titanium was also investigated and compared with a general-purpose cutting tool. Based on the experimental results, a model was constructed to predict the power consumption of the overall process. It is expected that this study will contribute to the more effective and efficient processing of titanium alloys.

**Key Words :** Cutting Tool(절삭공구), Power Consumption(전력소모), Machining Strategy(가공전략), Sustainability(지속가능성), Modeling(모델링)

### 1. 서 론

티타늄 합금은 일반적으로 높은 강도와 내부식성, 무독성, 고온에서의 안전성 등 여러 우수한 특성을 갖고 있으며<sup>[1,2]</sup>, 기계구조에서 생체의료까지 다양한 분야의 주목을 받고 있다. 특히 여타의 금속소재에 비해 대단히 높은 비강도(specific strength)를 가지고 있어 항공우주 분야를 중심으로 재료의 활용을 위해 많은 시도가 이루어져 왔다. 그러나

한편으로 재료의 높은 내열성과 내마모성 등은 가공 시 표면 품질과 공구 수명을 크게 악화시키는 요인이며<sup>[3]</sup>, 가공 시 배출되지 못하고 누적된 열은 Fig. 1과 같이 구성인선(built up edge, BUE)을 발생시키고 공구파손을 야기할 수 있다. 이와 같은 가공 상의 어려움은 재료제련의 어려움과 더불어 가공비용을 크게 증가시키며, 티타늄 합금의 범용화와 수요 창출을 막는 주요 원인이 되고 있다.

이렇듯 높은 내열성과 내마모성으로부터 발생하는 가공 공정상의 문제를 보완하기 위하여, 티타늄 합금 전용공구 개발, 레이저 보조 가공(laser-assisted machining)을 비롯한 융합공정 개발, 고압분

# Corresponding Author : hsyoon7@kau.ac.kr

Tel: +82-2-300-0079, Fax: +82-2-3158-2191

사냉각(high pressure coolant cooling), 극저온냉각(cryogenic cooling) 가공 공정 개발 등 다양한 연구가 이루어져 오고 있다<sup>[4]</sup>.

그러나 한편으로 이런 공정들은 추가적으로 많은 자원을 소모하는 공정이며, 공정의 효과 대비 추가 투입된 자원의 효율성을 재고할 필요가 있다. 특히 최근 지속 가능 제조(sustainable manufacturing)에 대한 관심이 높아져 가는 만큼, 다양한 공정에 대해 전력 소모 관점에서 공정을 평가하고자 하는 시도가 이루어져 오고 있으며, 강화되어 가고 있는 환경규제와 제약에 대비하여 여러 가공전략의 지속가능성을 분석할 필요가 있다.

이러한 관점에서, 이 연구는 다양한 가공 조건에 따른 표면 조도와 전력 소모 변화를 분석하여 경험 모델을 구성하고, 공정의 지속가능성 데이터를 확보하고자 하였다. 이 과정에서 일반적인 금속 가공에 널리 이용되는 범용공구(논문에서 general-purpose tool로 표기)와, 특별히 설계된 티타늄 전용공구(논문에서 specially designed tool로 표기)의 성능과 전력 소모를 비교함으로써 티타늄 가공 공정의 지속가능성을 평가하였다. 사용된 티타늄 전용공구는 특히 가공 시 진동을 억제하기 위해 절삭날이 부등분할(unequal division) 되고 고 헬릭스각(high helix angle)을 갖도록 설계된 공구이다 (Fig. 2).

연구를 통해 절삭 가공 시 소모되는 전력을 다양한 조건에서 분석하여 공구 특성에 따른 가공 품질과 전력 소모 특성을 비교함으로써, 전력 소모를 예측할 수 있는 모델을 개발하고 나아가 보다 지속 가능한 가공전략을 개발하고자 하였다.

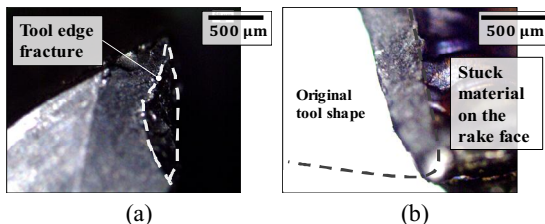


Fig. 1 (a) Fractured tool edge and (b) an example of built-up-edge formed during the machining of titanium alloys (Ti-6Al-4V)

## 2. 실험 조건 및 상세

다양한 가공 조건에서 가공성 변화를 관찰하기 위해 가공 변수로 주축 회전속도, 이송속도, 절삭 깊이( $a_p$ ), 절삭 폭( $a_e$ ) 4가지를 선정하였고, Table 1에 나와 있는 바와 같이 3수준의 실험을 1/3반복 일부실시법으로 수행(각 공구당 27개 실험 조건, 각 조건당 3회 반복)하였다. 장비로는 3축 공작기계(ROBODRILL  $\alpha$ -K10C, FANUC Corp., Japan)를 사용하였고 모재로는  $150 \times 150 \times 10t$  (mm) 크기의 항공용 Ti-6Al-4V (ASTM B265 Grade 5, Sejin Titanium, Korea)을 사용하였다. 공구로는 Fig. 2에 나온 바와 같이 범용 엔드밀(TSE-4120M-TT5515, TaeguTec Ltd., Korea)과 티타늄 가공 전용으로 개발된 부등분할 엔드밀(SED-4120U-TT5515, TaeguTec Ltd., Korea)을 각각 사용하고 공구에 의한 차이를 관찰하고자 하였다. 공구의 제품 번호에 나와있듯, 4날의 직경 12 mm 엔드밀이며 재종은 TT5515로 동일하나 공구 형상에서 다소 차이를 갖는다.



Fig. 2 Images of (a) general-purpose end-mill (TSE-4120M-TT5515), and (b) specially designed tool for titanium machining (SED-4120U-TT5515). Both have a diameter of 12 mm and from TaeguTec Ltd., Korea

Table 1 Experimental conditions

Level	Rotational speed (RPM)	Feed (mm min <sup>-1</sup> )	$a_p$ (mm)	$a_e$ (mm)
-1	500	50	1	2
0	750	80	2	7
1	1000	110	3	12

아울러 지속가능성 평가를 위해 전력량계 (PAC4200, Siemens Industry Inc., Germany)를 동작기계의 배전반에 부착하여 기계 전체의 사용 전력을 측정하였고, 가공성 평가의 지표로써 표면 조도 측정기(stylus-tip radius  $2 \mu\text{m}$ , SJ-410, Mitutoyo Corp., Japan)로 가공된 표면의 거칠기를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 가공 조건에 따른 표면 조도 변화

우선 가공 조건에 따른 표면 조도( $R_a$ )를 분석하였으나, 주어진 범위 내 조건 변화에 따른 유의미한 변화는 관찰되지 않았다. Fig. 3의 그래프는 임의의 다섯 가지 가공 조건에 따른 표면 조도를 공구 종류별로 나타낸 것이다. 언급하였듯 하나의 가공 조건에서 3회의 반복실험을 진행하였고, 이때의 표면 조도 평균과 표준 편차를 나타내었다.

그래프에서 범용공구와 티타늄 전용공구의 결과를 비교하면 평균값의 차이는 전체적으로 미미한 수준이지만 결과의 편차에서 다소 차이가 있으며, 특히 범용공구에서 비교적 큰 편차의 표면 조도값이 측정되었다. 이는 두 공구가 절삭날 반경(edge radius)에서는 크게 차이가 없으나, 전용공구의 부등분할 및 고 헬릭스각이 절삭진동을 억제하는데 효과가 있어<sup>[6]</sup>, 공정을 안정화했기 때문으로

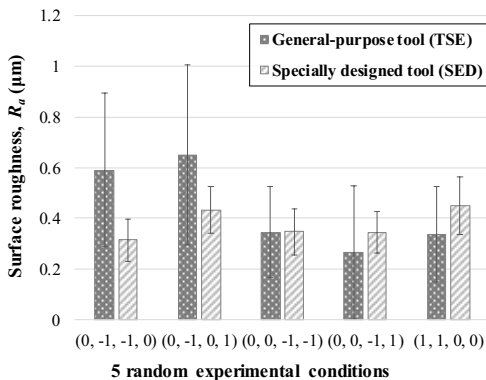


Fig. 3 Comparisons of surface roughness ( $R_a$ ) at 5 different conditions. Experimental conditions are (rotational speed, feed,  $a_p$ ,  $a_e$ ) levels, respectively

사료된다.

한편, Fig. 4는 가공 조건에 따른 표면 형태를 관찰한 것으로, Fig. 4(b)는 가공한 표면, Fig. 4(c)는 가공 부위의 측면을 관찰한 것이다 (Fig. 4(a) 참조). 앞서 언급했듯, 좁은 범위에서는 표면 거칠기의 뚜렷한 차이가 나타나지 않으나 측면을 관찰하였을 때 범용공구는 큰 버(burr)를 발생시켰으며, 또한 육안으로 보았을 때 확연한 날 자리(tool mark)를 보여주는 경우가 많았다 (Fig. 4(d)).

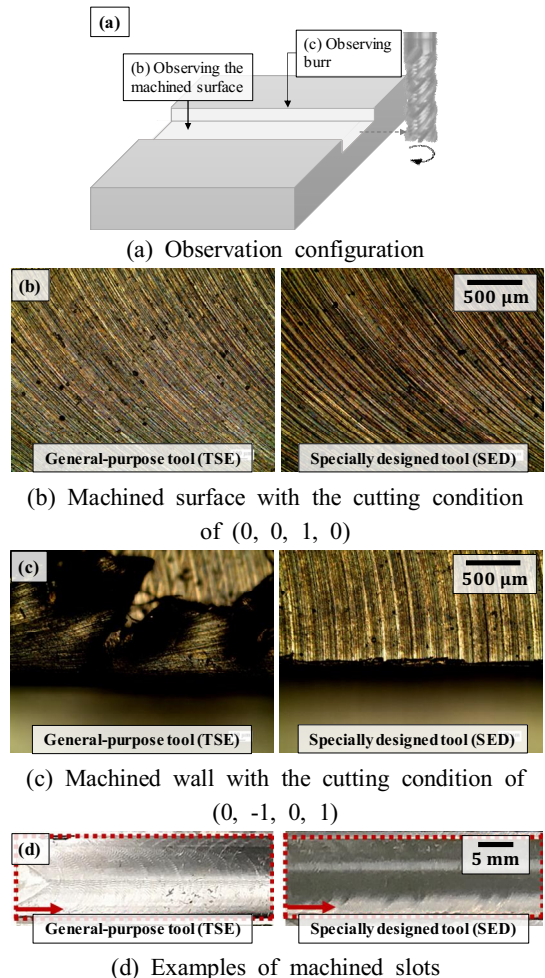


Fig. 4 Comparisons of surface morphology at various cutting conditions. Experimental conditions are (rotational speed, feed,  $a_p$ ,  $a_e$ ) levels, respectively

이러한 결과를 종합하였을 때, 표면 조도는 가공 변수에 따라 유의미한 차이를 보이지 않았으나, 범용공구 대비 전용공구가 보다 일정하게 우수한 품질을 보임을 알 수 있다.

### 3.2 머시닝센터의 전력 소모와 비교

한편, 가공 조건별로 전력 소모는 대단히 유의미한 변화를 보였으며, 이에 가공 조건을 변수로써 임의의 조건에서 전력 소모를 예측할 수 있는 모델을 구성하고자 하였다. 우선 실험을 통해 측정하는 전력은 배전반에서 측정하여 장비 전체가 소모하는 전력이므로, 장비 구동에 이용되는 기계 전력 ( $P_{MACHINE}$ )과 순수하게 가공 공정에서 비롯되는 절삭 전력 ( $P_{CUTTING}$ )으로 나누어<sup>16)</sup> 각각을 분석하였다.

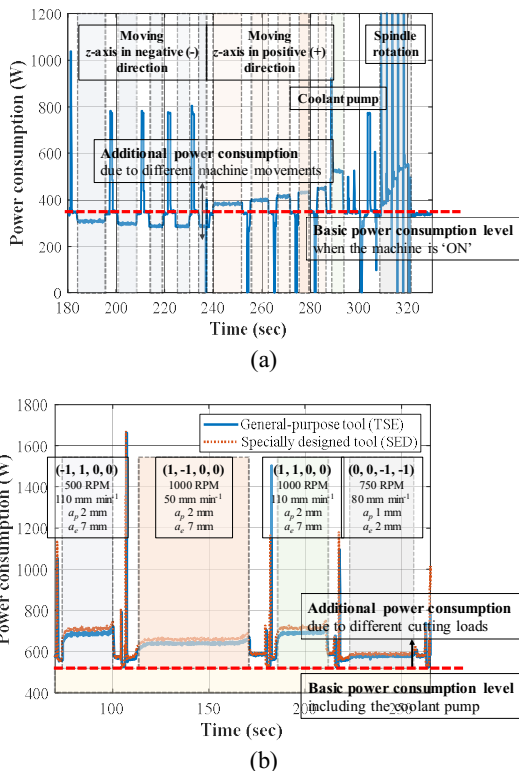
우선 기계 전력 모델을 구성하기 위해, 장비가 일정 동작을 반복하게 하고 단순히 장비를 켜는 때 일정하게 소모되는 기본전력( $P_{BASIC}$ )과 동작 시 소모되는 전력을 비교함으로써 특정 동작에 드는 전력을 분석하였다.

Fig. 5(a)는 장비에서 기계 전력 모델을 위해 측정된 전력 소모 그래프의 예를 나타낸다. 실험에서 사용된 장비의 경우 장비를 켜는 순간 기본적으로 약 330 W 정도를 소모하며 (그림의 굵은 빨간 점선), 테이블을 움직이거나 주축을 구동할 때 추가로 전력을 소모한다. 그림에서 z축을 다른 속도로 움직일 때, 주축을 다른 속도로 회전시킬 때, 절삭유 펌프를 가동할 때 각각 다른 크기의 전력을 소모하는 것을 관찰할 수 있다.

z축을 음의 방향으로 움직일 때는 중력의 영향을 받아 기본전력보다 작은 값의 전력 소모를 보이는데, 이러한 현상에 대해서는 기존 연구를 통해 분석한 바 있다<sup>17)</sup>. 그래프에서 관찰되는 peak은 테이블, 혹은 주축의 급가속/감속에서 관찰되며, 때로는 3상 전력시스템에서 마치 음의 전력을 소모하는 것과 같이 표현되기도 하나, 이 연구에서는 특정 동작 중의 평균값을 취하여 기계 전력 모델을 구성하였다.

한편 Fig. 5(b)는 절삭 전력을 측정하기 위해 다양한 가공 조건에서 측정된 전력 소모 그래프의 예를 나타낸다. 가공 시 절삭유 펌프가 항상 구동되고 있어 여기서는 약 520 W 정도를 상시 소모하며, 절삭으로 야기되는 부하로부터 추가 전력을 소모하고 그 차이로써 절삭 전력 모델을 구성할 수 있다. 공구에 따른 절삭 전력의 차이는 크지 않으나, 티타늄 전용공구가 범용공구에 비해 약 10-50 W의 전력을 더 소모하는 것으로 관찰되었다.

이는 전용공구의 고 헬릭스각에서 야기되는 높은 절삭력으로 인한 것으로 생각되며, 다른 기하를 동일하게 유지하고 순수하게 헬릭스 각만 증가시킨 연구와 비교하여 전력 변화 경향이 절삭력 변화 경향과 유사한 것으로 사료된다. 선행논문에서는 비슷한 헬릭스각 차의 공구를 비교하였을 때 5-15% 차이의 절삭계수 차이가 보고된 바 있다<sup>18)</sup>. 이처럼, 다양한 조건에서의 전력 소모를 분석함으로써 전력 소모 예측모델을 구성할 수 있었다.



**Fig. 5** Examples of power consumption profiles (a) with machinery parts only (table, spindle, pump, etc.) and (b) with various cutting loads from different conditions

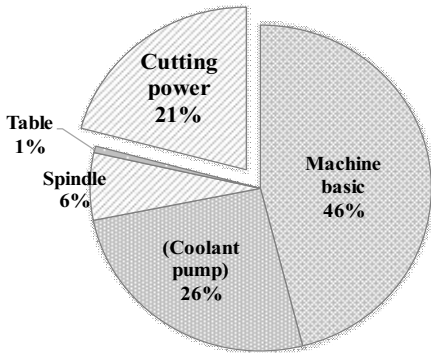


Fig. 6 Power consumption distribution

Fig. 6에는 특정 가공 조건(1000 rpm, feed 110 mm min<sup>-1</sup>, a<sub>p</sub> 2 mm, a<sub>e</sub> 7 mm)에서 소요되는 전력 분포를 기계요소별로 분류하여 나타내었다. 실험에 이용된 장비의 경우 절삭유 펌프를 포함하여 약 72% 정도의 전력을 상시 소모하며, 나머지 28% 정도의 전력이 조건에 따라 변화함을 알 수 있다. 이 중 절삭 전력이 차지하는 비중은 약 21% 수준이다.

### 3.3 경험모델을 통한 전력 소모 예측

앞 절의 실험을 통해 구성된 기계 전력의 식을 아래와 같이 나타내었다.

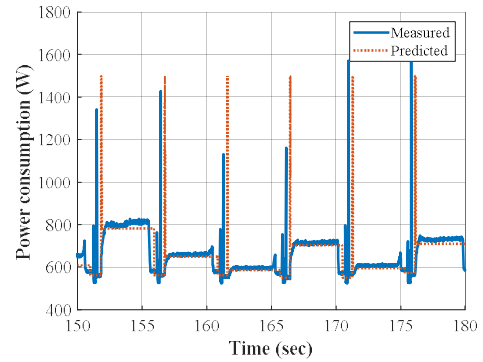
$$P_{MACHINE} = 331.63 + 0.045 * rpm + 185.69 * [coolant] + 0.038 * feed_{z+} - 0.011 * feed_{z-} \quad (1)$$

(rpm)은 주축의 회전속도, [coolant]는 절삭유 펌프의 구동 여부(1 (구동) 또는 0 (구동 안함)), feed<sub>z+</sub>와 feed<sub>z-</sub>는 각각 양과 음의 방향으로 z축의 구동 속도이다. x, y축을 움직이는 경우는 속도에 상관없이 추가 전력 소모가 무시할 만 하였다.

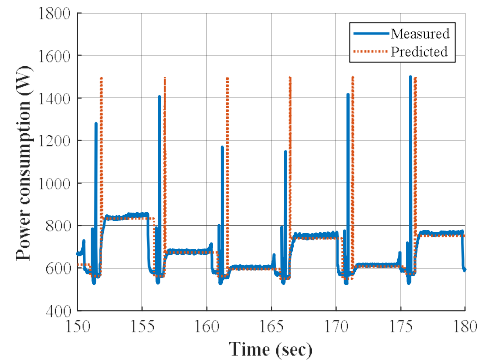
여기에 더하여, 가공에 소요되는 절삭 전력을 공구 종류에 따라 아래와 같이 나타내었다.

$$P_{CUTTING, TSE} = -5.64 - 0.022 * rpm + 0.36 * feed + 1.64 * a_p + 0.19 * a_e + 7.14 * a_p * a_e \quad (2)$$

$$P_{CUTTING, SED} = -6.68 - 0.031 * rpm + 0.25 * feed + 7.40 * a_p + 0.45 * a_e + 5.62 * a_p * a_e \quad (3)$$



(a) General-purpose tool (TSE)



(b) Specially designed tool (SED)

Fig. 7 Comparisons of measured and predicted power consumption with various cutting conditions

식 (2)와 (3)에서 feed는 절삭 방향으로의 이송 속도이다. 공구에 따라 계수의 차이가 일부 있었으며, 특히 절삭 폭과 깊이의 교호작용이 있는 것으로 분석되었다. 식에서는 모든 변수가 0일 때 음의 값을 갖도록 표현되었는데, 이는 보간 식을 구성할 때 나오는 값으로서 수백 W에 이를 수 있는 절삭 전력 값의 범위와 비교하였을 때 오차 전력 범위 안에 포함될 수 있는 값으로 사료된다.

개발된 모델을 통해 가공 전 G-code로부터 기계 전력과 절삭 전력을 예측할 수 있다. Fig. 7은 다양한 가공 조건에 대해 모델에서 예측한 전력 소모(점선)와 실제 측정된 결과(실선)를 비교한 예시이며, 예측값이 실험값과 대체로 잘 들어맞음을 알 수 있다. 예측값의 peak는 급속이송에서 비롯

되었으며, 공구가 모재에 접촉하는 순간부터 완전히 절입되는 순간 사이에서 다소간의 오차를 가진다. 모델을 분석한 결과, 범용공구에 대한 정확도가 96.89%, 티타늄 전용공구에 대한 정확도가 97.64%로, 구성된 모델로써 공구에 상관없이 전력을 잘 예측할 수 있었다.

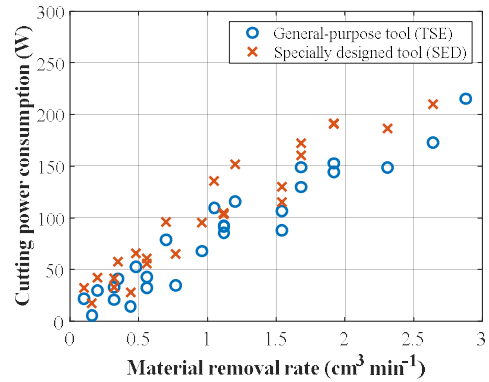
### 3.4 최적의 가공전략 평가

에너지 관점에서 최적의 가공전략을 도출하기 위해, 재료제거율(material removal rate, MRR)에 따른 절삭 전력과 단위 부피 제거 당 소모되는 비에너지(specific energy)를 비교하였다.

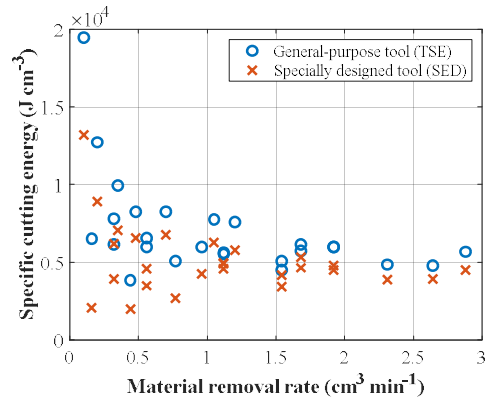
Fig 8의 (a)는 재료제거율에 따른 가공전력을 나타낸 것으로, 재료제거율이 증가할수록 가공전력이 증가하는 선형적 거동을 확인할 수 있으며, 앞서와 같이 전용공구가 다소 높은 전력을 소모하는 것을 알 수 있다. Fig 8 (b)는 재료제거율에 따른 순수 가공에 소모되는 비에너지(specific cutting energy, SCE)를 나타낸 것으로, 재료제거율이 증가할수록 절삭에 필요한 비에너지는 감소하는 경향을 보인다. 또한 특정 구간부터는 비에너지가 일정한 값에 수렴하며, 이는 일반적인 절삭력의 분포 결과와 유사하다<sup>[9]</sup>. 이러한 경향은 장비가 소모하는 전체 비에너지(specific total energy, STE)의 그래프에서 더욱 두드러지게 나타난다 (Fig 8 (c)). 이는 장비가 움직이지 않을 때도 소모하는 기본 전력에 의한 영향을 받은 것이다.

한편, 재료제거율에 대한 전체 비에너지의 데이터를 활용하여 에너지 관점에서 최적의 가공전략을 도출하였다. 4가지 가공인자에 따른 전체 비 에너지를 모델링하고, 민감도 분석을 통해 각각 인자의 영향을 분석하였다. 식 (2)와 (3)에서 볼 수 있듯, 전체 비에너지 관점에서 가공 시 주축 회전 속도는 낮을수록, 이송속도는 높을수록 단위 부피의 제거 당 소모되는 에너지는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 절삭 깊이와 폭은 모두 선형적인 경향을 보이지 않았으며, 이는 특히 공구-모재 간 마찰(혹은 공구-모재 간 접촉면적)로부터 야기되는 두 인자의 교호작용에 의한 것으로 생각된다.

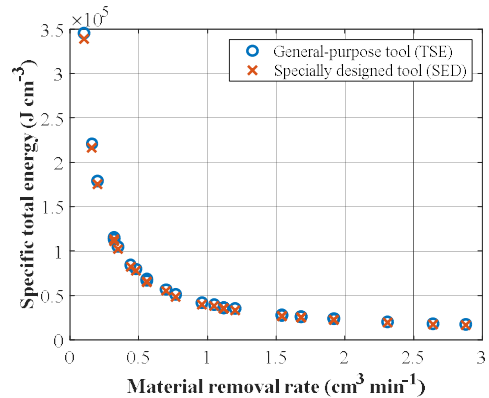
가공 인자별 영향 분석에 더해 가공 중 총 전력이 최소가 되는 가공 조건과, 총 비에너지가 최



(a) Cutting power consumption



(b) Specific cutting energy



(c) Specific total energy

Fig. 8 Power consumption analysis in terms of material removal rate

소가 되는 가공 조건을 도출하여 Table 2에 비교하였다. 총 전력이 최소가 되는 조건은 범용공구

**Table 2 Predicted power consumptions in terms of different cutting conditions**

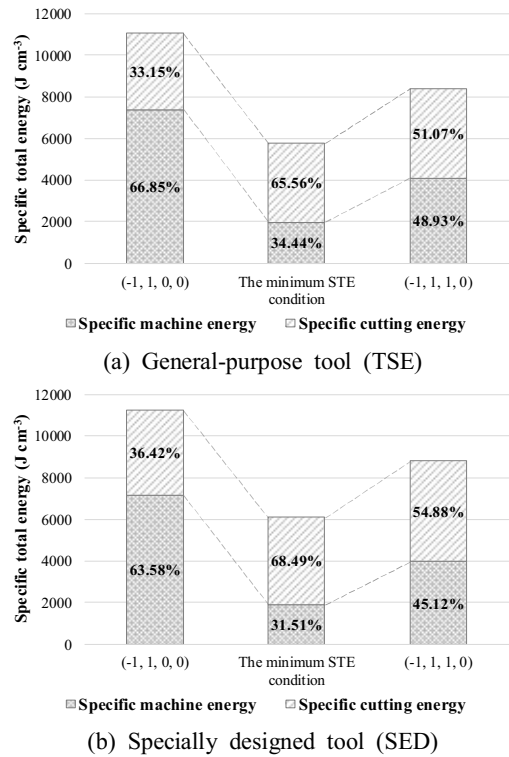
Tool		Conditions	MRR (cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> )	Power (W)
General-purpose tool (TSE)	Min total power	500 rpm 50 mm min <sup>-1</sup> <i>a<sub>p</sub></i> 1 mm <i>a<sub>e</sub></i> 2 mm	0.1	565.46
	Min specific energy	500 rpm 110 mm min <sup>-1</sup> <i>a<sub>p</sub></i> 2.232 mm <i>a<sub>e</sub></i> 8.667 mm	2.128	727.09
Specially designed tool (SED)	Min total power	500 rpm 50 mm min <sup>-1</sup> <i>a<sub>p</sub></i> 1 mm <i>a<sub>e</sub></i> 2 mm	0.1	575.85
	Min specific energy	500 rpm 110 mm min <sup>-1</sup> <i>a<sub>p</sub></i> 2.230 mm <i>a<sub>e</sub></i> 8.667 mm	2.128	745.53

와 티타늄 전용공구 모두 재료제거율이 가장 작은 조건으로 선정되었으나, 비에너지가 최소가 되는 가공 조건은 민감도 분석에서의 최적점이 선정되었다. 이 조건에서의 재료제거율은 비교적 큰 편이나, 가공 범위 중 가장 큰 값은 아니다.

또한 최적 조건의 가공 조건과 실험의 기준이 되었던 0수준의 중간 가공 조건(750 rpm, feed 80 mm min<sup>-1</sup>, *a<sub>p</sub>*: 2mm, *a<sub>e</sub>*: 7mm)과의 조합을 비교하였을 때, 최적점에서 소모되는 비에너지는 0수준 가공 조건 대비 범용공구 42.32%, 티타늄 전용공구 43.33%의 저감이 있었다.

최적점에서 모델로써 계산한 비에너지가 최소가 되는 경향을 분석하기 위해, 절삭 영향과 장비 영향을 분리하였다. Fig. 9의 그래프는 최적점과 최적점에서의 예측값을 기준으로 재료제거율이 작은 가공 조건(왼쪽)과 큰 가공 조건(오른쪽)의 측정된 비에너지 분포를 나열한 것이다.

재료제거율이 최적조건보다 작은 경우 전체 비에너지 중 가공에 소모되는 비에너지의 비율은 범용공구는 33.15%를 차지하였고 티타늄 전용공구는 36.42%를 차지했다. 최적조건에서는 전체 비에



**Fig. 9 Specific energy consumption distribution**

너지 대비 가공 비에너지의 비율이 범용공구 65.56%, 티타늄 전용공구 68.49%로 범위 중 최댓값을 가질 것으로 예상된다. 그러나 최적점보다 재료제거율을 증가시킬 경우 비에너지의 비율이 범용공구 51.07%, 티타늄 전용공구가 54.88%로 다소 감소하였다. 이는 재료제거율이 감소했을 때도 마찬가지로, 전체 비에너지에서 기계 전력의 영향을 최소화함으로써 에너지를 저감할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

가공 공정의 지속가능성을 평가하기 위해, 이 연구에서는 범용공구와 티타늄 전용공구를 이용하여 다양한 가공 조건에서 티타늄 합금 가공 시 전력과 표면 조도의 변화를 분석하였다. 이를 통해 전력 소모를 예측할 수 있는 경험 모델을 구축하고 최적

가공 조건을 도출할 수 있었다. 같은 조건에서 티타늄 전용공구는 범용공구 대비 10-50 W의 전력을 추가로 소모하나, 이는 전용공구의 기하학적 특성인 고 헬릭스각에 의한 것이며 전체 소모 전력인 500-900 W 대비 비교적 작은 수준이다.

그러나 두 공구로 가공한 품질을 비교하면 전용공구의 우수성이 잘 드러난다. 수행한 실험 범위 내에서 표면 조도를 측정하였을 때 그 평균값은 가공 조건에 따라 유의미한 변화 추세를 보이지 않았고 공구 간 차이도 미미한 편이었으나, 범용공구의 경우 거칠기가 일정하지 않아 비교적 큰 범위의 편차와 함께 큰 버를 발생시켰다. 이는 범용공구 대비 전용공구에서 달라진 기하가 우수한 가공성 확보에 효과가 있음을 보여주는 결과이다.

전력 소모 모델 측면에서는 두 공구 모두 일반적으로 재료제거율이 증가함에 따라 보다 많은 전력을 추가로 소모하였다. 그러나 주어진 실험 범위 내에서 절삭 폭과 깊이의 교호작용이 있어 무작정 재료제거율을 증가시키는 것이 에너지효율을 높인다고 보기 어려우며, 또한 더 험한 가공 조건의 사용은 공구마모 증가에 큰 영향을 미칠 것이다. 실제로 보다 높은 재료제거율의 가공 조건을 실험하려 하였으나, 일부 조건에서 급작스러운 공구 파손이 발생하여 보다 넓은 범위의 가공 조건의 영향을 분석하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

이러한 결과를 바탕으로 추후에는 보다 다양한 난삭재 가공 공정과 함께 에너지 저감 기법에 관한 연구를 진행할 계획이다. 가공 조건의 조정과 더불어 기계설계 개선 등 다양한 저감 전략을 시험해보고자 한다. 예컨대 이 연구에서는 상시 구동되는 절삭유 펌프가 전체 전력 소모의 26% 정도를 차지하였는데, 이를 적절하게 제어할 수 있다면 가공 품질을 잃지 않으면서 보다 효율적인 가공을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 연구를 통해 가공 공정의 지속가능성에 대한 보다 깊은 재고와 함께 보다 효율적인 가공 공정 개발에 기여할 수 있게 되기를 기대한다.

## 후 기

“이 연구는 2019년도 정부(산업통상자원부, 과학기

술정보통신부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원(No. 20003806), 한국연구재단(No. NRF-2018R1C1B5085752)의 지원과 2018년도 한국항공대학교 교비지원 연구비의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.”

## REFERENCES

1. Kim, G. H., "A Study on Characteristics of Cutting by Conditions in Titanium Machining," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 1, pp. 84-89, 2013.
2. Bae, M. W., "A Study on Wear Characteristics of Cutting Tools in a Titanium Roughing Cut Machining," Transactions of the KSAE, Vol. 24, No. 1, pp. 67-73, 2016.
3. Park, D. G., Kim, T. H., and Jeon, E. C., "Determination of Flow Stress and Cutting Force Prediction of Ti-6Al-4V Material for 3D Printer using S-K Constitutive Equation," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 68-74, 2018.
4. Shokrani, A., Al-Samarrai, I., and Newman, S. T., 2019, "Hybrid Cryogenic MQL for Improving Tool Life in Machining of Ti-6Al-4V Titanium Alloy," Journal of Manufacturing Processes, Vol. 43, Part A, pp. 229-243, 2019.
5. Sakata, S., Kadota, T., Yamada, Y., Nakanishi, K.J., Yoshioka, H., Suzuki, N., and Kakinuma, Y., "Chatter Suppression in Parallel Turning with Unequal Pitch using Observer based Cutting Force Estimation," Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Manufacturing Science and Engineering Conference, Vol. 3: Manufacturing Equipment and Systems, ASME, No. V003T04A056, 2017.
6. Yoon, H. S., Singh, E., and Min, S., "Empirical Power Consumption Model for Rotational Axes in Machine Tools," Journal of Cleaner Production, Vol. 196, pp. 370-381, 2018.



7. Yoon, H. S., Lee, J. Y., Kim, M. S., Kim, E., Shin, Y. J., Kim, S. Y., Min, S., and Ahn, S. H., "Power Consumption Assessment of Machine Tool Feed Drive Units," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, article in press, 2019.
8. Ozturk, E. Ozkirimli, O., Gibbons, T., Saibi, M., and Turner, S., "Prediction of Effect of Helix Angle on Cutting Force Coefficients for Design of New Tools," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 65, Issue 1, pp. 125-128, 2016.
9. Zhang, X. Q., Woon, K. S., and Rahman, M., "Comprehensive Materials Processing," *Newnes*, Vol. 11, pp. 201-220, 2014.