

Analysis of Temperature and Surface Roughness in Aerosol Dry Lubrication (ADL) Machining for Titanium

Jeong Sik Han · Jong Yun Jung[†]

Department of Industrial & Systems Engineering, Changwon National University

티타늄의 에어로졸 건조 윤활(ADL) 가공에서 온도 및 표면거칠기 분석

한정식 · 정종윤[†]

창원대학교 산업시스템공학과

The function of coolant in machining is to reduce the frictional force in the contact area in between the tool and the material, and to increase the precision by cooling the work-piece and the tool, to make the machining surface uniform, and to extend the tool life. However, cutting oil is harmful to the human body because it uses chlorine-based extreme pressure additives to cause environmental pollutants. In this study, the effect of cutting temperature and surface roughness of titanium alloy for medical purpose (Ti-6Al-7Nb) in eco-friendly ADL slot shape machining was investigated using the response surface analysis method. As the design of the experiment, three levels of cutting speed, feed rate, and depth of cut were designed and the experiment was conducted using the central composite planning method. The regression expressions of cutting temperature and surface roughness were respectively obtained as quadratic functions to obtain the minimum value and optimal cutting conditions. The values from this formula and the experimental values were compared. As a result, this study makes and establishes the basis to prevent environmental pollution caused by the use of coolant and to replace it with ADL (Aerosol Dry Lubricant) machining that uses a very small amount of vegetable oil with high pressure.

Keywords : RSM(Response Surface Method), Slot Milling, Cutting Temperature, Surface Roughness, ADL (Aerosol Dry Lubrication)

1. 서론

1.1 연구 배경

절삭유는 기계가공 시 발생하는 열에 의한 절삭 저항을 감소시키고 절삭 표면의 품질을 높이기 위해서 황, 염소,

인, 붕소 포르말린 등 인체에 해로운 극압 첨가제(Extreme pressure additives)가 혼합되어 있으므로 작업자에게 호흡기 계통의 질병을 유발하여 작업환경을 오염시킨다. 이런 위험을 최소화하기 위하여 친환경 가공 시스템이[6, 7] 필요하다. 따라서 절삭유는 사용 및 폐수 처리 방법까지 사회적으로 관심이 확대되고 있다.

친환경 기계가공을 할 수 있는 MQL(Minimum Quantity Lubrication) 가공을 적용하려는 시도와 연구가 상당히 진행되고 있다.

Minton et al.[15]은 순환 전후의 냉각수 온도 변화 측정

을 통해 절삭 공정에서 제거된 열을 정량화하고 간접 냉각으로 공구 수명을 연장하여 높은 수준의 표면을 유지할 수 있도록 하였다. Daniyan et al.[2]은 티타늄 합금의 밀링 가공에서 표면거칠기를 최소화하고 절삭 매개 변수의 실현이 가능한 조합으로 생성하였다. Li et al.[13]은 절삭 온도 측정을 위해 근적외선 2색 발열 계 시스템을 개발하여 적용하였고 Zhuang et al.[25]은 수치 시뮬레이션을 기반으로 Ti6Al4V의 직교 절단에서 표면거칠기에 대한 절삭 날 반경의 영향을 조사하고 이를 미세 mesh를 사용한 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 그리고 Jayarjun Kadam and Mahajan[9]는 건식 가공에서 티타늄 합금 Ti-6Al-4V를 절삭 공구 온도의 유한 요소 모델링을 제시하였으며, Kikuchi[10]은 티타늄 합금(Ti-6Al-4V 및 Ti-6Al-7Nb) 가공의 절삭온도를 공구-공작물 열전대의 열기전력을 측정하여 추정하였다. Kumar Gupta et al.[12]은 유한 요소법을 통해 절삭온도 및 절삭력의 시뮬레이션을 수행하여 시뮬레이션 결과를 실험으로 검증하였으며, Soler et al.[23]은 적외선 방사온도계를 이용하여 티타늄 합금의 건식 직교 절단 중 공구 온도를 측정하였다. Akkuş and Yaka[1]는 표면거칠기, 진동 및 에너지 소비 사이에 관계가 있다고 가정하여 이송 속도가 최적의 표면거칠기와 진동 및 에너지 소비를 절감하기 위한 파라미터임을 발표하였다. El Aoud et al.[4]은 절단면의 미세 구조를 분석하고 Taguchi 방법을 사용하여 표면거칠기를 최적화하였다. 또한, Siva Surya[22]은 Ti-6Al-4V 티타늄 합금을 가공하면서 재료 제거 속도 및 표면거칠기에 미치는 영향을 파악하는데 수학적 예측 모델을 사용하였다. Thirumalai et al.[24]는 파라미터 최적화에 Taguchi 방법 및 반응표면분석법을 적용하여 분산분석으로부터 절삭온도에 가장 영향을 미치는 파라미터는 절삭 속도이며, 그 다음은 절삭 깊이인 것을 확인했다. Pittalà and Monno[19]는 밀링의 공작물 온도를 적외선 카메라를 사용하여 측정하였다.

1.2 연구 필요성 및 연구 목적

앞 절에서 기술한 바와 같이 절삭유 사용의 장점이 있지만, 환경파괴와 작업자에게 유해하다는 단점이 크기 때문에 친환경 가공 방법이 절실하다. 따라서 본 연구는 기계가공의 환경오염을 최소화하고 절삭유의 비용을 줄이는 경제적인 가공 방법으로서, 미세 극소량의 식물성 oil을 공구 인선과 가공지점에 분사하여 공구와 소재 간의 윤활성을 좋게 하여 발생하는 열을 감소하는 방식의 ADL(Aero Dry Lubrication) 밀링을[20] 티타늄 합금(Ti-6Al-7Nb)의 slot 형상 가공에 적용한다. 일반 합금 소재를 이용한 ADL 가공에 관한 연구는 있었으나, 티타늄을 이용한 연구는 많지 않아, 상온에서 ADL 친환경 밀링 가공의 계기를 마련

하고자 한다.

밀링 가공에서 반응표면분석법을 사용하여 가공의 3대 파라미터 변화가 절삭온도와 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하고, 절삭온도와 표면거칠기의 예측 식을 제안하여 최소 절삭온도와 최소 표면거칠기를 얻을 수 있는 가공 조건을 도출하는 것을 연구 목적으로 한다.

2. 실험 설계 및 데이터

2.1 실험 설계

절삭온도 측정은 ADL 밀링 가공 시편에 가공 중에 발생하는 열을 적외선 열화상 카메라(Infrared Thermal, H2640)[8]를 통해서 측정한다. 절삭가공 파라미터인 절삭 속도(V), 이송 속도(f), 절삭 깊이(d) 3 인자를 절삭온도와 표면거칠기에 영향을 미치는 주요 인자로 선정하고, 절삭온도에 가공 인자의 영향을 분석하기 위한 실험을[18] 설계한다. 절삭 속도 V55~65[M/min], 이송 속도 f0.3~0.5 [mm/rev], 절삭 깊이 d1.5~2.5[mm] 내에서 3 수준을 정한다. 티타늄 합금 절삭가공의 현업 및 공구 메이커의 제안을 기준으로 최적 값을 2번째 수준으로 하고 상위 1수준 하위 1수준을 추가하여 3수준으로 설정한다.

2.2 실험 데이터 수집

절삭온도 측정에 사용하는 적외선 열화상 카메라의 최소 감지 온도 $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$, 온도 측정범위 $-40\sim 2,000^{\circ}\text{C}$ 에서 초당 30프레임으로 촬영한다[8]. 아래 <Table 1>은 열화상 카메라의 규격, <Table 2>는 ADL 가공 및 측정 적용 장비의 규격이며, <Table 3>은 ADL 가공에서 oil 분사 규격을 나타낸다. 본 실험에서 H2640 카메라를 이용하여 측정범위 수평 뷰 120mm, 수직 뷰 90mm의 지점인 시편 상 방향 300mm 위치에서 공구와 시편 사이에 발생하는 절삭온도를 측정한다.

<Table 1> Infra Red Thermal Image Specification

Infrared Detector	Uncooled Focal Plane Array
Spectral Range	Spectral Range
Measuring Range	-40 to 500°C (Optional 200 to 2000°C)
Sensitivity	0.06°C at 30°C
Accuracy	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ or $\pm 2\%$
Field of View	21.7°(H)×16.4°(V) with standard lens
Spatial Resolution	0.6 mrad with standard lens
Thermal image pixels	640(H)×480(V) pixels

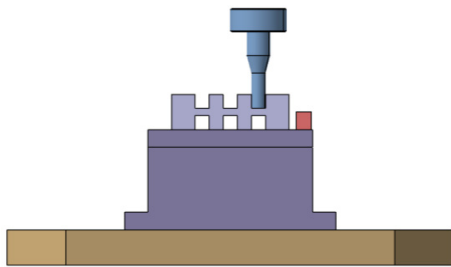
<Table 2> Instrument and Specification

Experimental equipment	Model	Company
CNC milling machine	CNC(C40U)	Herrmle
Multicomponent Dynamometer	9257B	Kistler
Charge amplifier	Type 5080A	Kistler
Aero Dry Lubrication	MASTER*4000	Rother
Infra Red Thermal camera	H2640	Japan
Surface roughness	SV-C3100	Japan

<Table 3> Supplying Oil Mist for Aerosol Dry Lubrication

Nozzle diameter	Lubricant flow rate	Vortex tube pressure
1.0 [mm]	20 [ml/h]	6 [bar]

아래 <Figure 1>은 ADL 가공에서 티타늄 합금 (Ti-6Al-7Nb) 실험 소재 100mm×100mm×30mm의 slot 가공 개략도를 나타내며, <Figure 2>는 공작기계 (C40U)에 공구 동력계와 열화상 카메라를 설치하여 가공 중의 데이터를 수집하는 모습을 보여준다.



<Figure 1> Tool Path Scheme of Specimen



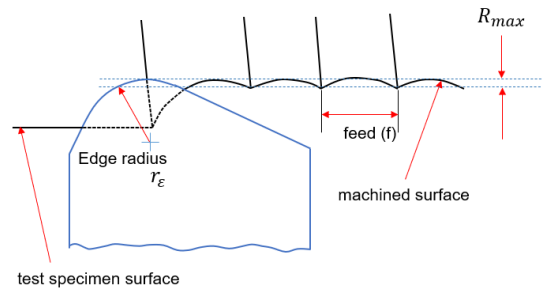
<Figure 2> Measuring Cutting Temperature on the Machine

2.3 절삭온도

기계가공의 열 분포에 대한 중요성은 Edward et al.[3]에 제시되어있다. 일반적인 조건에서 절삭력 대부분은 전단면에서 chip을 형성하는 데 사용되므로 절삭의 운동에너지가 온도 에너지로 변환되기 때문에 절삭온도가 상승한다. 절삭력의 측정과 절삭 요소, 공작물 재료의 열적 성질 데이터로부터 chip의 대략적인 평균 온도 상승을 계산하는 방법[5]을 설명하였다.

2.4 표면거칠기

이론적 표면거칠기는 절삭하는 공구 형상과 이송 속도에 따른 가공 표면 구간의 요철 높이 평균값으로서 공구의 built-up edge, 공구 및 기계의 진동, 기계와 공구 운동의 부정확성 등을 배제했을 때 얻을 수 있다.



<Figure 3> Ideal Surface Roughness Model

<Figure 3>은 산술평균 거칠기 R_a (arithmetic mean)를 나타낸다. 다인 공구(밀링 가공)에 의해 생성된 가공 면에서는 이상적인 조건에서 절삭 공구가 한 개의 날을 가지고 있다고 가정함으로써 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다[5, 21].

$$R_a = \frac{0.0624}{d_t} \left(\frac{v_f}{n_t} \right)^2 \tag{1}$$

- v_f : 이송 속도 [mm/rev.]
- d_t : 커터의 지름 [mm]
- n_t : 커터의 회전수 [rpm]

3. 중심합성계획법

3.1 중심합성계획법 실험

중심합성계획법의 면 중심으로 축 점(axial point), 중심 점(center point), 요인실험 점(cube point)을 가지는 cube 모

형으로 Lim[14] 설계한다. 아래 <Table 4>는 3 인자 실험의 설계[7]를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{실험의 횟수} &= \\ &= 8(\text{큐브 꼭짓점의 수}) + 2k(\text{축의 수}) + N(\text{중앙점}) \quad (2) \\ &= 8 + 6 + 1 = 15 \end{aligned}$$

<Table 4> Levels of Independent Variables

Factors	Level		
	-1	0	1
V (cutting speed) [M/min]	55	60	65
f (feed speed) [mm/rev.]	0.3	0.4	0.5
d (depth of cut) [mm]	1.5	2.0	2.5

아래 <Table 5>는 중심합성계획법에 의거 실험하여 절삭온도, 표면거칠기를 절삭력[7, 11]과 함께 측정된 자료이다.

<Table 5> Cutting Force from the Faced Centered Experiment

STO	RO	PT	V	f	d	C_t	S_r	R_f
8	1	1	1	1	1	184.775	1.961	835.219
3	2	1	-1	1	-1	148.712	1.321	461.196
1	3	1	-1	-1	-1	128.107	0.743	322.030
11	4	-1	0	-1	0	141.147	1.280	433.176
9	5	-1	-1	0	0	139.736	1.051	522.481
14	6	-1	0	0	1	164.810	1.115	667.713
6	7	1	1	-1	1	171.854	1.552	615.966
10	8	-1	1	0	0	180.526	1.389	589.412
13	9	-1	0	0	-1	141.319	0.891	411.012
4	10	1	1	1	-1	171.447	2.058	515.204
5	11	1	-1	-1	1	156.337	0.985	559.126
7	12	1	-1	1	1	167.321	1.642	741.837
2	13	1	1	-1	-1	144.739	0.931	351.099
12	14	-1	0	1	0	162.377	1.844	623.903
15	15	0	0	0	0	146.230	1.549	524.145

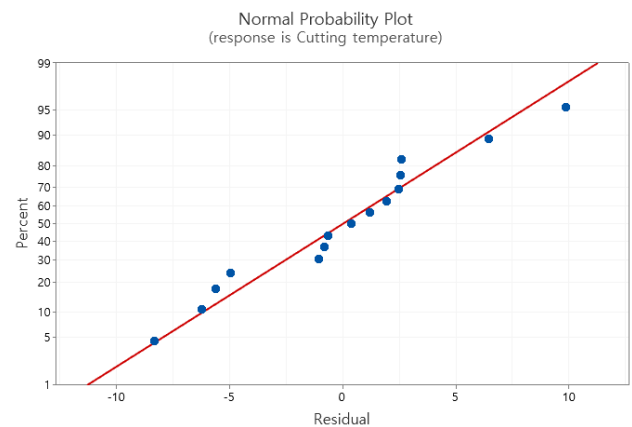
※ STO: standard no, RO: run order, PT: point type, BL: block
 R_f : Cutting force, C_t : Cutting temperature, S_r : Surface roughness

3.2 절삭온도

위 중심합성계획법 실험의 절삭온도 분산분석 결과값을 아래 표 <Table 6>에 나타내며, <Figure 4>는 잔차의 정규성을 나타내는 그래프이다[17]. R-squared 91.58%로서 정규분포를 따른다고 할 수 있고, 인자 V, f, d 및 2차 교호작용 V*V가 P값이 0.000, 0.026으로 유의하다고 할 수 있다.

<Table 6> Analysis of Variance for Cutting Temperature (C_t)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	3584.5	896.12	27.18	0.000
Linear	3	3361.5	1120.50	33.99	0.000
V	1	1279.8	1279.81	38.82	0.000
f	1	854.7	854.65	25.92	0.000
d	1	1227.0	1227.04	37.22	0.000
Square	1	223.0	222.99	6.76	0.026
V*V	1	223.0	222.99	6.76	0.026
Error	10	329.7	32.97		
Cor Total	14	3914.2			

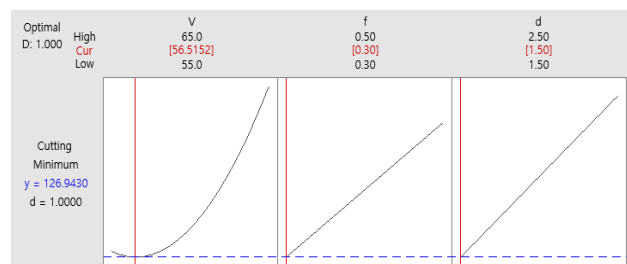


<Figure 4> Normal Probability for Response Surface

반응표면분석법으로 Park[17] 각 항의 계수를 구하고 3 인자에 관한 절삭온도를 2차 다항식으로 아래와 같이 구하였다.

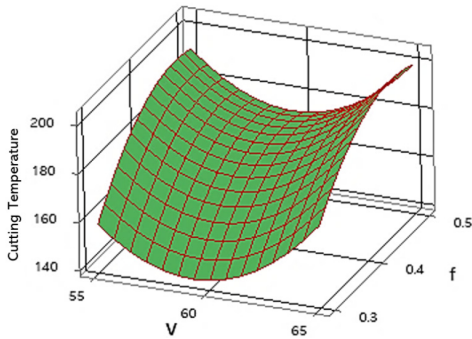
$$C_t(\text{cutting temperature}) = 1112 - 37.0V + 92.4f + 22.15d + 0.327V^2 \quad (3)$$

이 식으로부터 절삭온도의 최솟값은 V56.5152, f0.3, d1.5에서 126.943℃로 나타났다. 절삭온도는 절삭 속도가 증가함에 따라 감소하다가 이후 급격히 증가하였으나 이송 속도와 절삭 깊이의 증가에 따라 계속 상승하였다. 이와 같은 결과를 <Figure 5>에 절삭온도 최소화를 나타내었다.

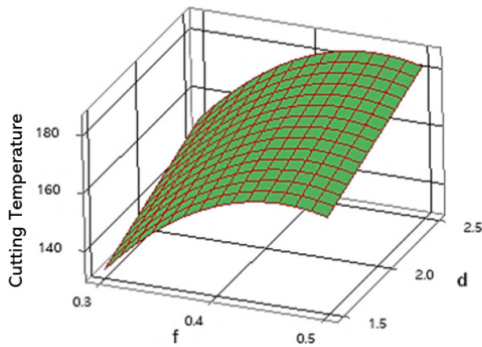


<Figure 5> Optimization of Cutting Temperature

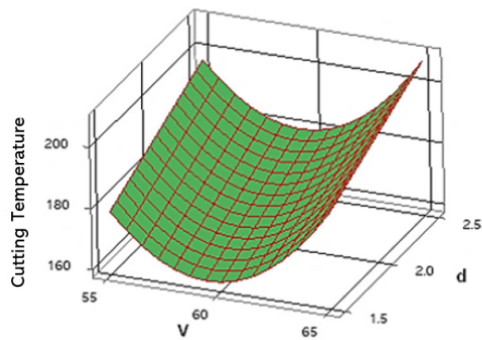
아래 그림 <Figure 6>, <Figure 7>, <Figure 8>은 한 인자를 고정한 후 2개의 인자의 변화에 따른 절삭온도의 변화를 나타낸다. <Figure 6>은 절삭 속도가 증가함에 따라 절삭온도가 낮아지다가 어느 시점에 상승하기 시작하였으며, <Figure 7>은 이송 속도의 증가에 따라 절삭온도 증가율이 초기에 컸으나 이후 점점 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 절삭 깊이의 영향은 <Figure 7>, <Figure 8>에서처럼 초기부터 거의 직선형으로 상승하였다. 이는 slot 가공에서 절삭 깊이의 증가는 공구와 소재의 접촉 면적이 비례하기 때문에 절삭 저항이 증가하여 절삭온도가 직선 형태로 상승한 것으로 보인다.



<Figure 6> Cutting Temperature on V and f at d=2



<Figure 7> Cutting Temperature on f and d at V= 60



<Figure 8> Cutting Temperature on V and d at f=0.4

3.3 표면거칠기

표면거칠기는 가공 slot 표면의 바닥을 각 절삭조건에 3번 측정된 값의 평균을 측정값으로 하였다. 아래 <Table 7>은 표면거칠기 측정기의 주요 사양을 나타낸다[16].

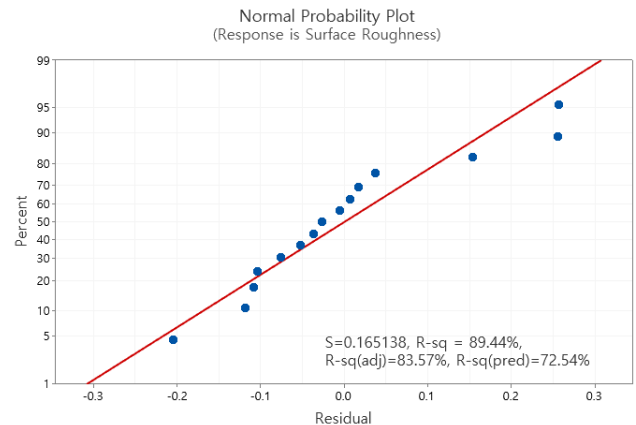
<Table 7> Specification of Measuring Machine

Measurement method	linear encoder
Measuring range	100mm
Decomposition ability	800 μ m /0.01 μ m, 80 μ m/0.001 μ m
Measuring force	4 mN or 0.75 mN
Skid radius of curvature	40mm

표면거칠기의 분산분석을 아래 표 <Table 8>에 나타냈다. 반응표면분석법으로 분석한 결과 인자 V, f, d 및 2차 교호작용 f*f, d*d의 P값이 0.003, 0.000, 0.033, 0.009, 0.042로 유의함을 알 수 있다. 아래 <Figure 9>는 잔차의 정규확률도로서 R-Sq(adj)가 83.57%로서 비교적 정규분포를 따른다고 할 수 있다.

<Table 8> Analysis of Variance for Surface Roughness (S_r)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	2.0783	0.41567	15.24	0.000
Linear	3	1.7453	0.58178	21.33	0.000
V	1	0.4625	0.46246	16.96	0.003
f	1	1.1112	1.11125	40.75	0.000
d	1	0.1716	0.17163	6.29	0.033
Square	2	0.3330	0.16651	6.11	0.021
f*f	1	0.2978	0.29784	10.92	0.009
d*d	1	0.1522	0.15225	5.58	0.042
Error	9	0.2454	0.02727		
Cor Total	14	2.3238			

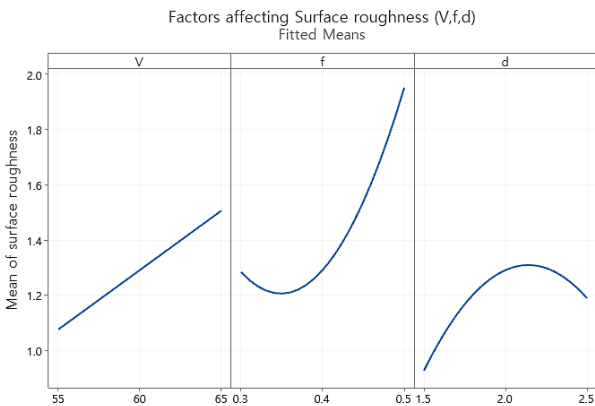


<Figure 9> Normal Probability for Surface Roughness

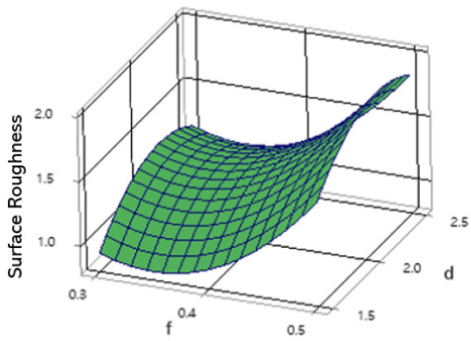
절삭 속도(V), 이송 속도(f), 절삭 깊이(d)에 따른 표면거칠기를 나타내는 2차 다항식을 반응분석법으로 아래와 같이 구하였다.

$$S_r(\text{surface roughness}) = -1.66 + 0.0430V - 22.76f + 3.99d + 32.61f^2 - 0.933d^2 \quad (4)$$

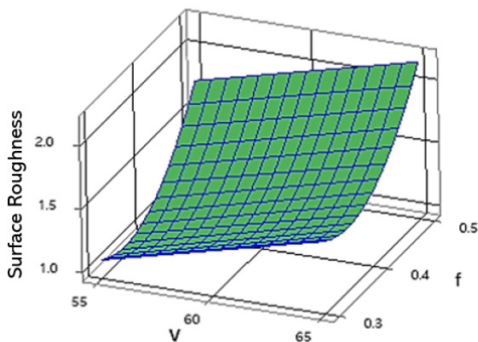
위 식으로부터 표면거칠기의 최솟값은 V55, f0.349, d1.5에서 0.6196 μm 으로 나타났다.



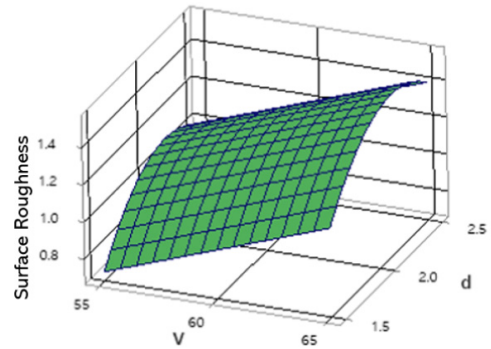
<Figure 10> Main Factors affecting Surface Roughness



<Figure 11> Surface Roughness on f and d at V=60



<Figure 12> Surface Roughness on V and f at d=2.0



<Figure 13> Surface Roughness on V and d at f=0.4

표면거칠기는 절삭 속도의 증가에 따라 증가하였으나 이송 속도의 증가에 따라 감소하다가 어느 시점 이후 매우 증가하였다. 절삭 깊이가 증가함에 따라 증가하다가 감소하였다. 이와 같은 결과를 다음 그림 <Figure 10>에 나타내며, <Figure 11>, <Figure 12>, <Figure 13>은 절삭 속도 V=60, 절삭 깊이 d=2.0, 이송 속도 f=0.4로 고정 후 나머지 2개 인자의 변화에 따른 표면거칠기를 나타낸다.

4. 절삭온도 및 표면거칠기 비교

4.1 절삭온도 비교

실험의 측정치와 반응표면분석법으로 구한 2차 회귀식의 절삭온도 값을 15개 실험값과 비교한 결과 94.389% ~ 99.699%로 오차 범위 이내에서 대부분 일치한다고 판단한다. 아래 <Table 9>는 실험 치와 회귀식으로부터 구한 예측치의 비교를 나타낸다.

<Table 9> Experimental and Predicted Values for Cutting Temperature (C_t)

No	V	f	d	PV	EX	PA
1	55	0.3	1.5	127.721	128.107	99.699
2	55	0.5	1.5	146.210	148.712	98.318
3	55	0.5	2.5	168.365	167.320	99.379
4	55	0.4	2	148.043	139.736	94.389
5	55	0.3	2.5	149.875	156.337	95.867
6	60	0.4	2	151.177	146.229	96.727
7	60	0.3	2	141.932	141.147	99.447
8	60	0.4	2.5	162.254	164.810	98.449
9	60	0.4	1.5	140.099	141.319	99.137
10	60	0.5	2	160.421	162.376	98.796
11	65	0.4	2	170.668	180.526	94.539
12	65	0.5	2.5	190.990	184.775	96.746
13	65	0.3	1.5	150.347	144.739	96.270
14	65	0.5	1.5	168.836	171.447	98.477
15	65	0.3	2.5	172.501	171.854	99.625

※ PV: predicted, EX: experimental, PA: percentage.

4.2 표면거칠기 비교

표면거칠기의 실험치와 예측치를 비교한 결과 비교적 일치한다고 판단된다. 일부 벗어난 값은 공작기계와 공구의 진동 등 외부 요인 때문일 것으로 생각할 수 있다. 아래 <Table 10>은 실험 치와 회귀식으로부터 구한 예측치의 비교를 보여준다.

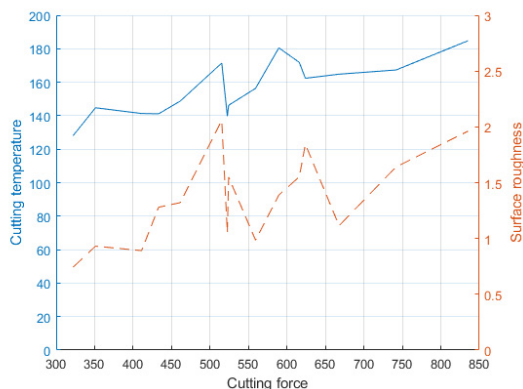
<Table 10> Experimental and Predicted Values of Surface Roughness (S_r)

No	V	f	d	PV	EX	PA
1	55	0.3	1.5	0.706	0.743	95.020
2	55	0.5	1.5	1.372	1.321	96.283
3	55	0.5	2.5	1.634	1.642	99.512
4	55	0.4	2	1.077	1.050	97.493
5	55	0.3	2.5	0.967	0.985	98.173
6	60	0.4	2	1.300	1.549	83.925
7	60	0.3	2	1.285	1.280	99.610
8	60	0.4	2.5	1.189	1.115	93.776
9	60	0.4	1.5	0.928	0.891	96.013
10	60	0.5	2	1.95166	1.844	94.483
11	65	0.4	2	1.507	1.388	92.103
12	65	0.5	2.5	2.065	1.961	94.964
13	65	0.3	1.5	1.136	0.931	81.954
14	65	0.5	1.5	1.802	2.058	87.560
15	65	0.3	2.5	1.400	1.552	90.206

※ PV: predicted, EX: experimental, PA: percentage.

5. 비교 분석

절삭온도와 표면거칠기는 절삭력[6]과 밀접한 관련이 있을 것으로 예상하여 그 관계를 아래 그림 <Figure 14>에



<Figure 14> Cutting Temperature and Surface Roughness with respect to the Cutting Force

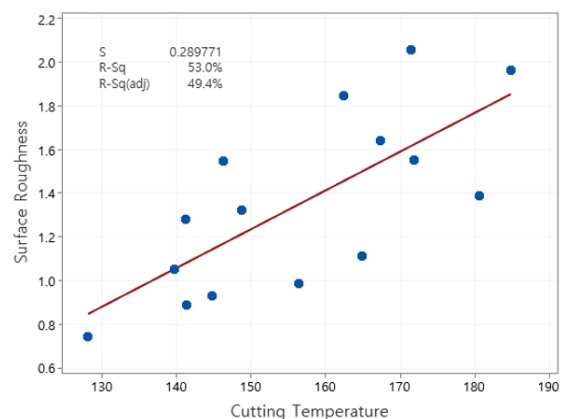
나타낸다. 전체적인 경향으로서 절삭력이 증가하면 절삭온도와 표면거칠기가 증가하는 양상으로 보인다. 절삭 저항 때문에 절삭온도의 증가는 자연스러우나, 절삭온도의 증가에 따라 표면거칠기도 증가하는 현상을 아래 그림에서 볼 수 있다.

절삭력을 제외하고 절삭온도와 표면거칠기의 관계는 아래 그림 <Figure 15>와 같이 나타낼 수 있으며 이를 최소자승법을 이용한 직선식으로서

$$\text{Surface Roughness} = -1.425 + 0.01774 * \text{Cutting_Temperature}, \quad (5)$$

R-Sq (adj) = 49.4%

로 fitting할 수 있다. 일반적인 절삭가공 이론에서 표면거칠기는 앞의 식 (1)과 같이 이송 속도에 비례하고 절삭 속도에 반비례하는 것으로 알려졌으나, 위 결과로부터 표면거칠기는 절삭온도와 어느 정도 비례관계가 있음을 알 수 있다.



<Figure 15> Cutting Temperature vs Surface Roughness

6. 결론

본 연구는 ADL 밀링을 이용한 slot 형상 가공에서 절삭온도와 표면거칠기에 미치는 인자인 절삭 속도, 이송 속도, 절삭 깊이에 대하여 실험계획법을 적용하여 실험 후 결과를 분석하였다. 중심합성계획법으로 인자의 변화에 따른 절삭온도와 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였으며 2차 다항 회귀식을 추정하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 절삭온도는 이송 속도, 절삭 깊이의 증가에 따라 증가하며, 절삭 속도는 2차 교호작용도 영향을 미쳐 감소하다가 어느 시점에 증가한다.

2. 표면거칠기는 절삭 속도에 따라 증가하며, 이송 속도와 절삭 깊이는 각각 2차 교호작용도 영향을 미치므로 최댓값과 최솟값이 존재한다.
3. 절삭온도의 최솟값은 실험의 범위 내에서 절삭 속도 V56.515m/min, 이송 속도 f0.3mm/rev, 절삭 깊이 d1.5mm에서 126.943℃로 나타났다.
4. 표면거칠기는 절삭 속도 V55m/min, 이송 속도 f0.349mm/rev., 절삭 깊이 d1.5mm에서 0.6196 μ m로서 최솟값으로 나타났다.
5. 실험의 범위 내에서 표면거칠기는 절삭온도와 어느 정도 비례관계에 있기 때문에, 가공 표면품질 향상을 위해 절삭 속도를 낮게 하여 절삭온도를 저하하는 것이 좋다.
6. 절삭 속도의 증가는 절삭온도와 표면거칠기를 상승시키며 또한 공구마모 증가 등을 고려해보면 ADL 티타늄 가공에서 절삭 속도는 최적값을 유지하는 게 바람직하다.
7. 이상의 연구는 기존의 절삭가공학설과 크게 다르지 않으므로, 극압 첨가제 (Extreme pressure additives)를 함유한 일반 절삭유 사용으로 인한 환경오염에서 벗어나 미세 극소량의 식물성 oil을 사용한 ADL 친환경 가공으로 대체하여도 아무런 문제가 없는 것임을 시사한다.

References

- [1] Akkuş, H. and Yaka, H., Experimental and Statistical Investigation of the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness, Vibration and Energy Consumption in Machining of Titanium Ti-6Al-4V ELI (grade 5) Alloy, *Measurement*, 2021, Vol. 167, 108465.
- [2] Daniyan, I., Tlhabadira, I., Mpofu, K., and Adeodu, A., Investigating the Geometrical Effects of Cutting Tool on the Surface Roughness of Titanium Alloy (Ti6Al4V) during Milling Operation, *Procedia CIRP*, 2021, Vol. 99, pp. 157-164.
- [3] Edward, M., Trent, and Paul, K., *Wright, Metal Cutting* 4th, Butterworth Heinemann, 2000, pp. 97-100.
- [4] El Aoud, B., Boujelbene, M., Boudjemline, A., Bayraktar, E., Ben Salem, S., and Elbadawi, I., Investigation of Cut Edge Microstructure and Surface Roughness obtained by Laser Cutting of Titanium Alloy Ti-6Al-4V, *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 44, pp. 2775-2780.
- [5] Go, T.J., Kim, J.H., Park, Y.W., and Yang, S.H., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Second Edition, Dong Myeong Sa, 2013, pp. 111-168.
- [6] Han, J.S., and Jung, J.Y., The Characteristics of Titanium Alloy (Ti-6Al-7Nb) for Cutting Force in Aerosol Dry Lubrication (ADL) Machining, 2022 Spring Conference & International Symposium of Korean Society of Industrial and Systems Engineering, Jeju, Korea, 2022.6.23-25, p. 134.
- [7] Han, J.S. and Jung, J.Y., ADL Milling Characteristics for the Analysis of Cutting Force of Titanium Machining, *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering*, 2022, Vol. 45, No 3, pp. 104-114.
- [8] Infrared Thermography, H2640/h2630 Series, <https://www.infrared.avio.co.jp>.
- [9] Jayarjun Kadam, B., and Mahajan, K. A., Optimization of Cutting Temperature in Machining of Titanium Alloy using Response Surface Method, Genetic Algorithm and Taguchi Method, 2021, *Materials Today Proceedings*, 2021, Vol. 47, pp. 6285-6290.
- [10] Kikuchi, M., The Use of Cutting Temperature to Evaluate the Machinability of Titanium Alloys, *Acta Biomaterialia*, 2009, Vol. 5, Issue 2, pp. 770-775.
- [11] Kistler, Milling with Stationary Dynamometer, CAL-ST-M3-Typical Signal Curves 1/Bia/ Ed-10.14, pp. 11-15.
- [12] Kumar Gupta, M., Korkmaz, M.E., Sarıkaya, M., Krolczyk, G.M., and Günay, M., In-Process Detection of Cutting Forces and Cutting Temperature Signals in Cryogenic assisted Turning of Titanium Alloys: An Analytical approach and Experimental Study, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, Vol. 169, 108772.
- [13] Li, T., Long, H., Shi, T., Yang, J., and Duan, J., Cutting Temperature Measurement using a Novel Near-Infrared Two-Color Pyrometer under Dry and Wet Cutting of Ti-6Al-4V Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, Vol. 309, pp. 117751.
- [14] Lim, Y.B., Design Expert, Minitab and Design of Experiments using R., *Free Academy*, 2020, pp. 298-337.
- [15] Minton, T., Ghani, S., Sammler, F., Bateman, R., Fürstmann, P., and Roeder, M., Temperature of Internally-Cooled Diamond-Coated Tools for Dry-Cutting Titanium, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, Vol.75, pp.27-35.
- [16] MITUTOYO, Surface Roughness/ Contour Measuring System, FORMTRACER SV-C3100/4100 Series, Mitutoyo America Corporation, Aurora IL, 2011, pp. 12-13.
- [17] Park, J.S., Completion of New Mini-Tab Practice, Iretech Mini Tab Division, 2005, pp. 618-656.

- [18] Park, S.H., *Design of Experiments*, 3rd Edition, Min Young-Sa, 2012, pp. 453-504.
- [19] Pittalà, G. M., and Monno, M., A New Approach to the Prediction of Temperature of the Workpiece of Face Milling Operations of Ti-6Al-4V, *Applied Thermal Engineering*, 2011, Vol. 31, Issues 2-3, pp. 173-180.
- [20] ROTHER, Technologie, Rother Techno Logic GmbH & Co, 2016, pp. 7-17.
- [21] Seo, N.S., *Machining Engineering*, Dong Myeog Sa, 2010, pp. 197-211.
- [22] Siva Surya, M., Optimization of Turning Parameters while Turning Ti-6Al-4V Titanium Alloy for Surface Roughness and Material Removal Rate using Response Surface Methodology, *Materials Today: Proceedings*, 2022, Vol. 62, pp. 3479-3484.
- [23] Soler, D., Aristimuño, P., Garay, A., and Arrazola, P. J., Uncertainty of Temperature Measurements in Dry Orthogonal Cutting of Titanium Alloys, *Infrared Physics & Technology*, 2015, Vol. 71, pp. 208-216.
- [24] Thirumalai, R., Techato, K., Chandrasekaran, M., Venkatapathy, K., and Seenivasan, M., Experimental Investigation during Turning Process of Titanium Material for Surface Roughness, *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 45, part 2, pp. 1423-1426.
- [25] Zhuang, K., Gao, J., Ye, T., and Dai, X., Effect of Cutting Edge Radius on Cutting Force and Surface Roughness in Machining of Ti-6Al-4V, *Procedia CIRP*, 2022, Vol. 108, pp. 571-576.

ORCID

Jeong Sik Han | <http://orcid.org/0000-0002-3977-0147>

Jong Yun Jung | <http://orcid.org/0000-0003-2621-4229>