한국기계가공학회지, 제13권, 제4호, pp.83～90 (2014.8) ISSN 1598-6721 (Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.13 No.4, pp.83~90 (2014.8) ISSN2288-0771 (Online)

http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.4.083

알루미늄 합금의 스파이럴 상향가공 시 절삭조건이 표면거칠기에 미치는 영향

천세호#

(# 계명문화대학교 기계공학과)

Effects of cutting condition on surface roughness in the spiral up milling of aluminum alloy

Se-Ho Chun#

(Received 14 July 2014; received in revised form 7 August 2014; accepted 18 August 2014)

ABSTRACT

The spiral up milling of an aluminum alloy was performed in this study. In accordance with the cutting condition, the surface roughness behavior and significance of the research with regard to specific factors were analyzed. The cutting speed, feed, and depth of the cut were found to be statistically significant. A higher cutting speed improved the surface roughness. On the other hand, as the feed and depth of the cut increase, the surface roughness decreases. An interaction effect between the feed and depth of the cut was detected. According to the surface roughness in relation to the cutting conditions, the model showed non-linear behavior.

Key Words : Surface roughnee(표면거칠기), Up milling(상향가공), Cutting condition(절삭조건)

1. 서론

날로 첨단화되는 가공기술은 제품제조에 많은 영향을 끼쳤다. 이렇게 높아진 기술력을 바탕으로 제조현장에서는 높은 생산성과 고정밀도는 필수요건이 되어가고 있는 실정이다. 이를 뒷받침하기 위해 공작기계, 절삭공구, 그리고 첨단가공기술에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.

이와 더불어 피삭재의 가공성에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는데 특히 알루미늄 합금은 무르고 가공 시 절삭공구에 융착이 잘되는 특성으로 인해 산업현장에서 겪는 어려움이 많아 난삭재로 분류하고 있다. 알루미늄 합금은 비강도, 각종 화학작용에 대한 내부식성, 높은 열 및 전기전도도, 무독성, 좋은 성형성, 비자기성 등의 잇점으로 인해 그 수요가 높아지고 있다[1].

밀링머신으로 절삭하는 방법에는 하향절삭과 상향절삭으로 나눌 수 있다. 하향절삭에서는 공구의 인선에 작용하는 마찰저항이 적어 긴 공구수명을 얻을 수 있고, 상향절삭에서는 절삭저항이 점차적으로 증가하므로 절삭날에 작용하는 충격력이 적다[2]. 최근 공구제조 기술의 발달로 인해 날카로운 인선을 보유한 공구의 적용과 함께 공작기계의

Corresponding Author :
Department of Mechanical Engineering, KEIMYUNG COLLEGE UNIV.
E-mail : chunsh@kmcu.ac.kr

강성이 높아짐에 따라 상향절삭도 산업계에서 널리 적용되고 있는 실정이다.

박문진 등[3]의 연구에 의하면 상향절삭 가공면과 하향절삭 가공면은 각각 서로 다른 기하학적인 특징을 나타낸다고 하였다. 그리고 이상규 등[4]은 엔드밀의 측면 절삭 시 상향절삭과 하향절삭에서의 결과를 분석하였고 상향절삭에서 가공오차가 크게 감소한다고 하였다. Pinar[5]의 연구에서는 하향절삭 조건에서 절삭속도, 이송, 절입깊이가 유의한 인자라는 것이 판명되었고 각각의 교호작용에 대해서는 신뢰성이 없는 것으로 밝혀졌다. 하지만 상향절삭은 하향절삭과는 절삭 메커니즘이 다르기 때문에 상향절삭 조건에서 절삭조건에 따른 표면거칠기 거동에 대해 살펴볼 필요성이 있다.

이에 본 연구에서는 상향절삭에서 알루미늄 합금의 포켓 가공 시 절삭 조건이 표면거칠기에 미치는 영향에 대한 연구를 실시하였다. 선정된 인자는 절삭속도, 이송, 그리고 절입깊이이며 조건이 변화함에 따라 표면거칠기에 미치는 영향을 실험계획법(Design of Experiment)을 적용하여 분석하였다. 포켓 가공을 위해 CAM Software를 이용하여 스파이럴 툴패스를 생성하였고 생성된 코드를 CNC 밀링머신으로 전송하여 가공을 실시하였다. 포켓을 가공하는 툴패스 방식에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 스파이럴(Spiral) 가공에 초점을 맞추었다. 이는 Pinar[5]의 연구결과를 참고하였고 선정된 3가지 툴패스(Oneway, Parallel, Spiral) 중 스파이럴 툴패스에서 가장 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있었다는 결과에 근거한 것이다. 본 연구를 위해 직교배열표를 도입하였으며 S/N비(신호대잡음비)를 산출하여 요인별 주효과를 파악하였다. 또한 분산분석(ANOVA)을 실시하여 각 인자별 유의성을 정량적으로 비교, 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험설계

실험계획법이란 결과에 영향을 미친다고 예상되는 인자들을 선별하고 배치하여 효율적이고 경제적인 실험이 될 수 있도록 계획하는 방법을 의미하는 것이다. 이는 수학적인 방법을 빌어 실험방법의 설계 및 특성치의 획득방식, 그리고 최대의 정보를 얻을 수 있는 경제적인 실험방법을 설계하는 것이라고 정의할 수 있다[6,7].

결과값에 영향을 미치는 요인들의 특성을 효과적으로 분석하기 위해서 여러 가지 통계적인 방법을 사용한다. 일부실시법과 완전요인계획법으로 나눌 수 있으며 비용과 시간의 한계가 있는 경우는 일부실시법을 통해 한정된 효과만 파악할 수 있는데 직교배열표가 널리 사용되고 있다[7]. 본 연구에서는 교호작용까지 파악하기 위해 L27 직교배열표를 적용하였다.

독립변수는 절삭속도, 이송, 절입깊이의 3인자 3수준으로 설계하였다. 이송의 경우에는 치수효과에 의한 경작력(Ploughing Force)[8]을 최소화 시킬 수 있도록 0.05mm/tooth 이상으로 설정하였다. 모든 절삭조건 선정 시 공작기계의 동력을 고려하여 60% 이내에서 안정적인 가공이 될 수 있도록 하였다.

결과 분석을 위해 분산분석(ANOVA) 방법을 채택하였고 이를 실시하기 위해서는 결과값 전체의 산포와 요인들의 제곱합의 비율을 구해야 한다. 이를 분산비(Variance Ratio)라 하며 오차에 비해 큰 영향을 주는 요인들을 정량적으로 분석할 수 있게 한다[7]. 분산분석을 통해 인자의 유의성 정도를 파악하고 예측모델의 정밀도를 잔차분석으로 검증하였다.

2.2 실험장치

Fig. 1은 절삭공구가 장착된 주축을 나타낸 것이다. 절삭공구는 2날 알루미늄 가공용 HSS 엔드밀을 사용하였고 직경은 10mm 이다. 실험에 앞서 그림과 같이 런아웃(Runout)을 측정하였으며 그 결과 0.005 이내에 형성되었다. 런아웃은 절삭공구의 수명 및 절삭력의 변동에 큰 영향을 주기 때문에 사전에 고려해야할 요소이며 최근 김종도 등[8]에 의해 이론적으로 연구된 바 있다. 실험에 사용된 공작기계의 동력은 이며 칩 제거의 효율성과 융착을 방지하기 위해 습식가공으로 진행하였고 수용성 절삭유를 공급하였다. NC코드 생성을 위해 Fig. 2와 같이 상용 CAD/CAM software인 UG NX8.5를 이용

Fig. 1 Runout check for HSS endmill

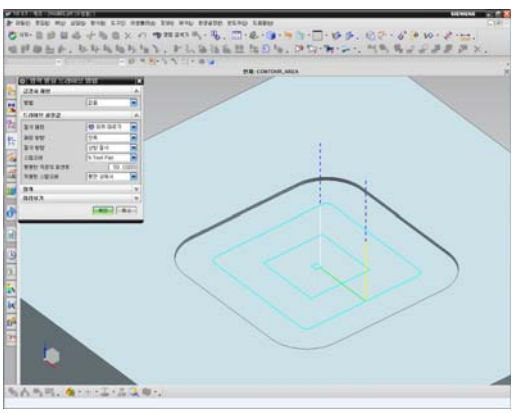

Fig. 2 NC code generation using UG NX8.5

하여 스파이럴 툴패스를 생성하였고 공작기계로 전송 후 가공을 수행하였다.

피삭재 형상은 가로 70mm, 세로 70mm, 두께 25mm 이며 모든 실험조건에서 변인통제를 위해 1회 실험 실시 후 소재 및 공구를 교환하였다. 재질은 알루미늄 합금의 일종인 A6061을 사용하였으며 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. 기계적 성질이 우수하기 때문에 산업계에서 구조용 재료로 널리 사용되고 있다.

Fig. 3은 표면거칠기 측정 장치 및 측정방법을 나타낸 것이다. 사용된 장비는 Mitutoyo사의 Surftest

Table 1 Mechanical properties of A6061

Specification	Value	Unit
Tensile Strength	265	N/mm^2
Yield Strength	245	N/mm^2
Elongation	8	%

Fig. 3 Surface roughness measurement

SJ-310이며 샘플링 구간은 5mm으로 설정하여 측정하였다. 중심선 평균 거칠기값(Ra, μm)을 특성치로 선정하였으며 Fig. 3과 같이 공구가 진행하는 방향으로 3회 측정하여 평균값을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

Table 2는 각 수준별 설계된 절삭조건을 나타내고 있다. 여기서 A는 절삭속도(m/min), B는 이송(mm/rev), 그리고 C(mm)는 절입깊이를 의미하며 각각 3수준으로 설계되었다.

Table 3는 각 시행에 따른 결과값을 나타내었으며 이를 토대로 식(1)과 같이 S/N비를 구하였다[6,7].

$$\frac{signal\ power}{noise\ power} = s/n\ ratio \qquad (1)$$

Table 2 Cutting condition

Factor	Level		
	1	2	3
A(cutting velocity)	100m/min	150m/min	200m/min
B(feed)	0.3mm/rev	0.6mm/rev	0.9mm/rev
C(depth of cut)	0.5mm	1.5mm	2.5mm

Table 3 Orthogonal array(L27) and results

Trial No.	Factor			Surface Roughness	S/N ratio
	A	B	C	Ra(μm)	
1	1	1	1	0.71	2.974
2	1	1	2	0.81	1.830
3	1	1	3	0.97	0.264
4	1	2	1	1.11	-0.906
5	1	2	2	1.12	-0.984
6	1	2	3	1.36	-2.670
7	1	3	1	1.13	-1.061
8	1	3	2	0.85	1.411
9	1	3	3	1.87	-5.436
10	2	1	1	0.78	2.158
11	2	1	2	0.76	2.383
12	2	1	3	0.79	2.047
13	2	2	1	0.80	1.938
14	2	2	2	0.75	2.498
15	2	2	3	1.05	-0.423
16	2	3	1	0.73	2.733
17	2	3	2	1.01	-0.086
18	2	3	3	1.25	-1.938
19	3	1	1	0.69	3.223
20	3	1	2	0.73	2.733
21	3	1	3	0.76	2.383
22	3	2	1	0.81	1.830
23	3	2	2	1.05	-0.423
24	3	2	3	0.91	0.819
25	3	3	1	0.85	1.411
26	3	3	2	0.76	2.383
27	3	3	3	1.21	-1.655

본 연구에서는 표면거칠기가 적을수록 개선된 경우이기 때문에 특성치가 적을수록 좋은 망소특성을 적용하였다. 망소특성을 계산하는 방법은 식(2)와 같으며 α는 실험반복 횟수, γ_i는 반복데이터를 의미한다[6,7].

$$s/n\ ratio = -10\log\left(\frac{1}{\alpha}\sum_{i=1}^{n}\gamma_i^2\right) \quad (2)$$

각 수준에서 표면거칠기에 대한 수준별 주효과를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 절삭속도가 증가함에 따라 표면거칠기는 향상되는 반면 이송 및 절입깊이는 수준이 증가함에 따라 표면거칠기가 나빠지는 경향을 알 수 있다.

Fig. 5는 인자들 간에 작용하는 교호작용에 대해 검토해본 결과이다. 그래프에서 알 수 있듯이 절삭속도에 대하여 이송 및 절입깊이는 교호작용 효과가 약하고 이송과 절입깊이 상호간에는 뚜렷하게 발행

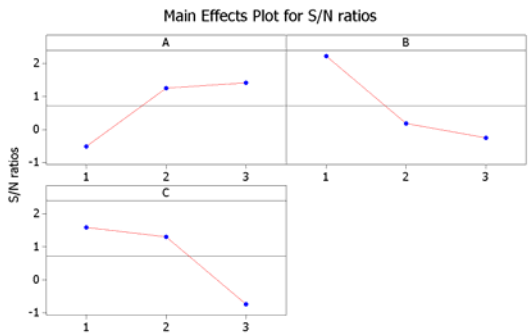

Fig. 4 Main effect plot for S/N ratio

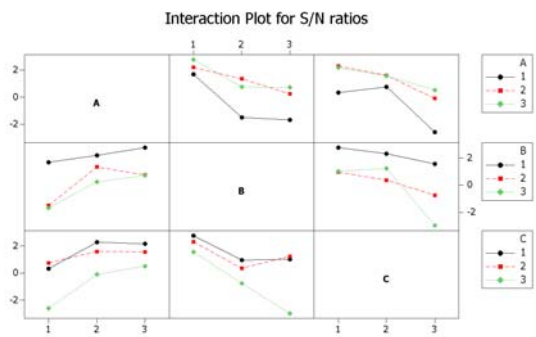

Fig. 5 Interaction plot for S/N ratio

하는 것을 알 수 있다. 이를 정량적으로 살펴보기 위해 분산분석을 실시하였고 그 결과가 Table 4에 나타난 바와 같다.

분산분석결과 절삭속도, 이송, 그리고 절입깊이는 95%의 신뢰수준 내에서 유의함을 보인다. 또한 이송과 절입깊이 서로간의 교호작용도 유의한 값을 보이지만 나머지 인자들은 신뢰수준이 낮아 모델의 전체적인 정밀도를 떨어뜨린다고 판단된다. 이에 잔차분석을 실시하였고 Fig. 6에 정규확률분포도(Normal probability plot)를 나타내었다.

절삭속도에 대한 이송과 절입깊이의 교호인자를 풀링(Pooling)시켜 분산분석을 재실시하였다. 그 결과 잡음요인이 사라져서 모든 인자들에서 유의도가 증가하여 보다 정교한 모델이 되었다. 분산분석 결과는 Table 5에 나타난 바와 같으며 잔차분석 결과

Table 4 Analysis of variance(ANOVA)

Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
A	2	0.323	0.323	0.161	8.55	0.010
B	2	0.422	0.422	0.211	11.17	0.005
C	2	0.445	0.445	0.222	11.79	0.004
AB	4	0.082	0.082	0.020	1.10	0.421
AC	4	0.111	0.111	0.027	1.48	0.295
BC	4	0.253	0.253	0.063	3.35	0.068
Residual Error	8	0.151	0.151	0.018		
Total	26	1.791				

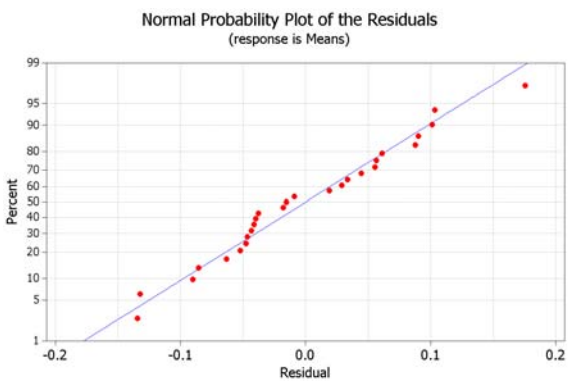

Fig. 6 Normal probability plot of the residuals

Table 5 Analysis of variance(ANOVA)

Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
A	2	0.323	0.323	0.161	7.48	0.005
B	2	0.422	0.422	0.211	9.77	0.002
C	2	0.445	0.445	0.222	10.31	0.001
BC	4	0.253	0.253	0.063	2.93	0.054
Residual Error	16	0.345	0.345	0.021		
Total	26	1.791				

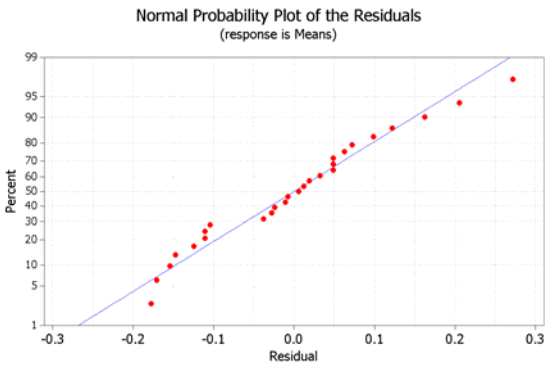

Fig. 7 Normal probability plot of the residuals

는 Fig. 7과 같이 정규분포에 수렴하는 정도가 향상된 것을 알 수 있다. 이는 풀링된 절삭속도와 이송, 절삭속도와 절입깊이에 관한 교호작용 인자가 전체 모델에 잡음(Noise)으로 작용했기 때문이다.

3.2 고찰

절삭속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 향상되는 이유는 절삭열에 의해 융착이 방지되어 절삭날이 날카롭게 유지되기 때문이라 판단된다. 본 연구에서는 변인통제를 위해 각 실험마다 절삭공구를 교환하였는데 이는 공구의 마모가 종속변수에 미치는 영향을 최소화시키기 위함이다. 그리고 Fig. 4에 나타난 주효과도에서 절삭속도에 따른 표면거칠기가 비선형적으로 거동함을 볼 수 있다.

이송 및 절입깊이가 증가함에 따라 표면거칠기는 나빠지는데 이는 이전연구[5]에서도 관찰된 결과이다. 반면 본 연구에서는 이송과 절입깊이에 대한

교호작용이 유의하다는 결론을 얻었는데 이는 상향 절삭에서는 두 인자가 서로에게 영향을 미치고 있다는 사실을 알 수 있다. 그러므로 본 연구의 결과를 토대로 회귀분석 실시한다면 표면거칠기 거동을 보다 명확하게 파악할 수 있다.

4. 회귀분석

4.1 선형회귀모델

적절한 모형을 이용하여 변수가 다른 변수들에 의하여 어떻게 설명 또는 예측되는지를 알아보는 통계적 방법을 회귀분석이라 한다[9]. 모델은 선형회귀모델과 비선형회귀모델로 구분된다. 먼저 식(3)과 같이 선형회귀모델을 설정하여 모델을 검증하였다. 식(3)에서 ψ는 종속변수를 나타내며 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_2, \ldots$ 는 회귀계수, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \cdots$는 종속변수를 의미한다. Table 3에서와 같이 본 연구의 결과를 바탕으로 각 회귀계수들은 최소제곱법에 의해 식(4)와 같이 구현되었다.

$$\psi = \alpha_0 + \alpha_1\gamma_1 + \alpha_2\gamma_2 + \alpha_3\gamma_3 + \alpha_{12}\gamma_1\gamma_2 + \alpha_{13}\gamma_1\gamma_3 + \alpha_{23}\gamma_2\gamma_3 \quad (3)$$

$$Ra = 1.04 - 0.120A - 0.066B - 0.071C + 0.107BC \quad (4)$$

결정계수(Coefficient of Determination, R^2)는 총 변동 중에서 추정회귀선에 의해 설명되는 변동의 비율이며 0에서 1사이의 값을 취한다[9,10]. 식(4)에서 나타낸 선형회귀모델의 결정계수는 0.64이며 본 모델의 잔차분석 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 정규성을 보이고 있다. 하지만 선형모델만으로 결과를 충분히 반영하고 있다고 결정하기는 어려우며 비선형모델과의 비교를 통해 판단해야 한다.

4.2 비선형회귀모델

변수들 간의 관계가 모두 선형관계인 것만은 아니다. 특히 교호작용과 같은 인자들간의 간섭이 있을 경우 비선형적인 결과를 보일때가 있다. 이를위해 식(5)와 같이 비선형회귀모델을 설정하였고 최소제곱법에 의해 식(6)과 같이 각 계수들을 구현하였다.

$$\psi = \alpha_0 + \alpha_1\gamma_1 + \alpha_2\gamma_2 + \alpha_3\gamma_3 + \alpha_{12}\gamma_1\gamma_2 + \alpha_{13}\gamma_1\gamma_3 + \alpha_{23}\gamma_2\gamma_3 + \alpha_{11}\gamma_1^2 + \alpha_{22}\gamma_2^2 + \alpha_{33}\gamma_3^2 \quad (5)$$

$$Ra = 1.54 - 0.533A + 0.214B - 0.538C + 0.107BC + 0.103A^2 + 0.07B^2 + 0.117C^2 \quad (6)$$

비선형회귀모델의 결정계수는 0.74이며 잔차분석 결과는 Fig. 9에 나타난 바와 같다. 이는 선형회귀모델의 결정계수 0.64보다 큰 수치이며 1에 가까울수록 모델의 정밀도가 높다고 볼 수 있다. 또한 잔차가 선형회귀모델이 비선형회귀모델보다 폭넓게

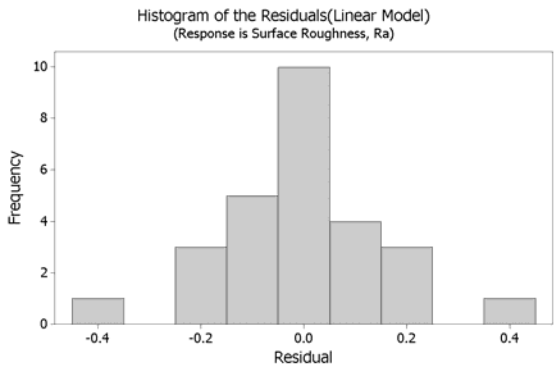

Fig. 8 Histogram of the Residuals(Linear)

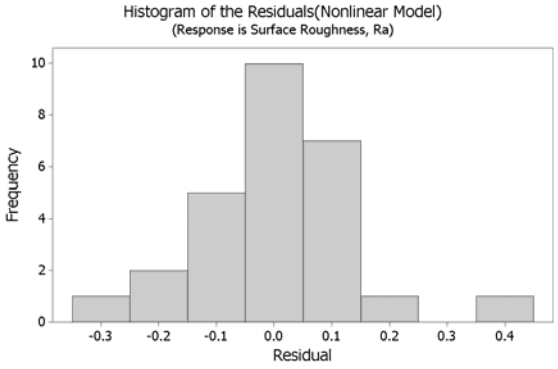

Fig. 9 Histogram of the Residuals(Nonlinear)

분포하고 있어 실험결과에 대한 모델의 설명력이 떨어진다. 그러므로 식(6)이 인자의 변동에 따른 표면거칠기 거동을 보다 정밀하게 표현하고 있다고 볼 수 있다.

4.3 최적조건선정

선정된 비선형회귀모델을 시각적으로 표현하기 위해 표면도(Surface plot)로 나타내면 표면거칠기 거동을 명확하게 파악할 수 있다.

Fig. 4에서 절삭속도, 이송, 그리고 절입깊이는 각각 3, 1, 1 수준에서 S/N비가 최대값을 나타내었으며 이를 토대로, 먼저 절입깊이를 1수준으로 고정하고 절삭속도와 이송에 대한 표면거칠기 거동을 표면도로 나타내보면 Fig. 10과 같다. 여기서 표면거칠기가 가장 양호하게 나오는 조건은 절삭속도가 2.587수준(194m/mim)일 때 이송 1수준이며 표면거

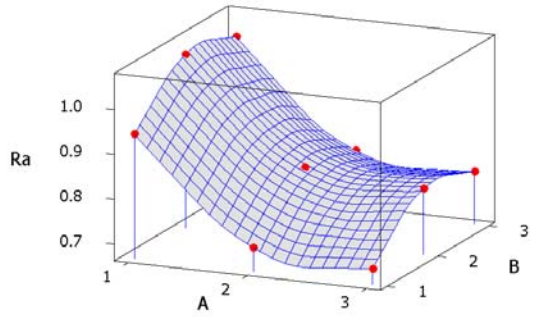

Fig. 10 Surface plot of Surface roughness(Ra) vs A(Cutting velocity), B(Feed)

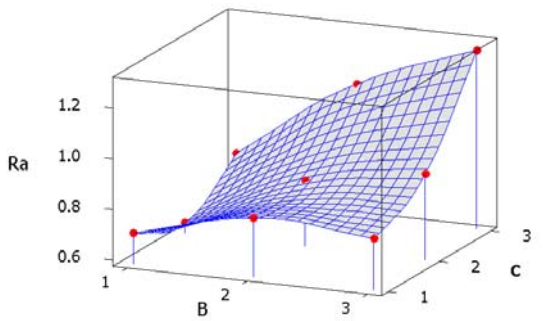

Fig. 11 Surface plot of Surface roughness(Ra) vs B(Feed), C(Depth of cut)

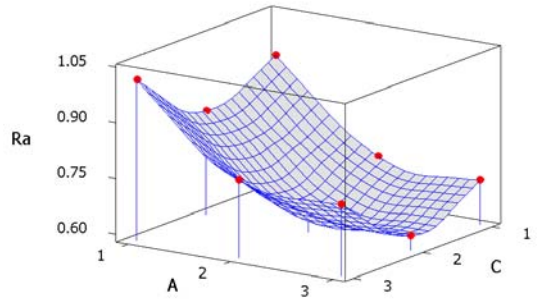

Fig. 12 Surface plot of Surface roughness(Ra) vs A(Cutting velocity), C(Depth of cut)

칠기값은 0.68㎛이다.

Fig. 11에서 절삭속도를 3수준으로 고정하고 이송과 절입깊이의 관계를 살펴보았다. 이때 이송이 1수준, 절입깊이는 1.841수준(1.38mm)일 때 표면거칠기값은 0.615㎛이다.

마지막으로 Fig. 12에서는 이송을 1수준으로 고정시킨 상태에서 절삭속도와 절입깊이와의 관계를 살펴보았다. 이때 Fig. 10과 같이 절삭속도가 2.587수준(194m/mim), 절입깊이는 1.841수준(1.38mm)일 때 표면거칠기값은 0.597㎛을 나타내었다. 그러므로 표면거칠기가 가장 양호하게 형성되는 조건은 절삭속도 194m/min, 이송 0.3mm/rev, 그리고 절입깊이 1.38mm일 때 이다.

5. 결론

최근 공구제조기술의 발달로 인해 날카로운 절삭인선을 제작할 수 있다. 이에 밀링가공 시 절삭날에 충격을 적게 형성시켜 공구수명 향상에 기여할 수 있는 상향절삭이 폭넓게 도입되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 상향절삭을 적용한 상태에서 알루미늄 합금의 스파이럴 포켓 가공 시 절삭조건에 따른 표면거칠기의 거동에 관한 연구를 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 상향절삭에서는 하향절삭에서와 마찬가지로 절삭속도, 이송, 그리고 절입깊이 모두 실험을 통해 유의한 것으로 확인 하였다.

2. 일반적으로 절삭속도가 높을수록, 이송과 절입깊이는 낮을수록 표면거칠기는 향상되지만 본 연구에서는 인자간 교호작용과 비선형적인 거동으로 인해 변곡점이 존재하였으며 절삭조건 범위내에서 표면거칠기가 최소화 되는 지점이 존재하였다.

3. 표면거칠기 거동에 대한 모델의 정밀도는 비선형회귀모델이 선형회귀모델보다 더욱 높았다. 이는 표면거칠기에 대한 후속연구 시 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

(1) Kalpakjian. S., “Manufacturing Processes for Engineering Materials (3rd Edition)”, Pearson Education Korea, pp. 124-125, 2000.

(2) Smith. G., “Cutting Tool Technology: Industrial Handbook”, Springer, pp. 151-155, 2008.

(3) Park. M. J., Kim. K., “Effects of the Tool Path on the Geometric Characteristics of Milled Surface”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 58-63, 1998.

(4) Lee. S. K., Ko. S. L., “Improvement of the Accuracy in Machining Deep Pocket by Up Milling”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 220-228, 1999.

(5) Pinar. A. M., "Optimization of Process Parameters with Minimum Surface Roughness in the Pocket Machining of AA5083 Alumium Alloy via Taguchi Method", Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 38, pp. 705-714, 2013.

(6) Chun. S. H., Ko. T. J., "Study on the dynamic stiffness variation of boring bar by Taguchi Method", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 3, pp. 98-104, 2009.

(7) Park. S. H., “Modern Design of Experiments”, Minyoungsa, 2003.

(8) Kim. J. D., Kim. D. S., "Theoretical analysis of Micro-Cutting Characteristics in Ultra-Precision Machining", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 49, No. 3-4, pp. 387-398, 1995.

(9) Choi. J. H., Yoon. B. H., Jeon. H. J., Sa. M. W., “Statistical Method using the Minitab(3rd Edition)”, Freeacademy, pp. 207-234, 2009.

(10) Lee. S. W., Lee. D. J., "A Prediction of Surface Roughness on the PCD Tool Turned Al5083 by using Regression Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 69-74, 2012.