

엔드밀을 활용한 홀 가공 시 표면거칠기 예측에 관한 연구

천세호*[#]

*계명문화대학교 기계과

Prediction of Surface Roughness in Hole Machining Using an Endmill

Se-Ho Chun*[#]

*Department of Mechanical Engineering, Keimyung College Univ.

(Received 1 April 2019; received in revised form 28 April 2015; accepted 9 May 2019)

ABSTRACT

Helical machining is an efficient method for machining holes using an endmill. In this study, a surface roughness prediction model was constructed for improving the productivity of hole machining. Experiments were conducted to form holes by the helical machining of AL6061-T4 aluminum sheets and correlation analysis was performed to examine the relationships between the variables based on the measured results. Meanwhile, a regression analysis technique was used to construct and evaluate the prediction model. Through these analyses, the parameter which has the greatest influence on the surface roughness when the hole is formed by the helical machining is the feed, followed by the number of revolutions of the endmill. Moreover, for the axial feed of the endmill, it was concluded that the influence of the surface roughness is small compared to the other two parameters but it is a factor worth considering to improve the accuracy when constructing the predictive model.

Key Words : Helical Machining(헬리컬가공), Surface Roughness(표면거칠기), Regression Analysis(회귀분석)

1. 서 론

공작물에 홀(Hole)을 형성하는 방법은 여러 가지가 있으며 특히 드릴을 이용한 가공이 일반적이다. 하지만 드릴 가공 시 극한 환경에서 발생하는 축방향 절삭력(Axial force)은 홀의 가공정도를 떨어트리는 요인이 될 수 있다^[1]. 이에 많은 연구자들^[2-5]은 적은 가공부하로 효율적인 홀 가공을 할 수 있는 방법을 지속적으로 연구하였으며 CAM기술의 발달

과 함께 엔드밀을 활용한 헬리컬 가공(Helical Machining)이 그 대안으로 제시되었다. 특히 엔드밀은 드릴에 비해 가공영역이 넓어 홀 가공뿐만 아니라 다양한 가공이 가능하다. 밀링머신에서 한 번의 공구 세팅으로 다양한 형상의 공작물을 가공할 수 있을 뿐만 아니라 한 개의 공구로 다양한 직경의 홀을 생성할 수 있기 때문에 효율적인 가공방법으로 실무현장에서 적용되고 있다. 헬리컬 가공의 정밀도에 대한 연구를 살펴보면 크게 홀의 치수정밀도, 진원도, 버(Burr), 박리(Delamination), 그리고 표면거칠기(Surface Roughness) 등에 초점을 두고 있

Corresponding Author : chunsh@kmcu.ac.kr

Tel: +82-53-589-7621, Fax: +82-53-589-7372

다.^[6-10] 이 중 표면거칠기는 다른 부품과의 결합 시 제품의 성능에 영향을 미치는 직접적인 인자로서 품질검사의 척도로 활용되고 있다.

본 연구에서는 엔드밀을 이용한 홀 가공에서 표면거칠기를 예측하여 절삭조건 선정 시 생산성을 높이고자 하는 방법에 대해 연구를 진행하였다. 이를 위해 통계적인 예측방법 중 상관과 회귀분석을 실시하고 예측모델을 평가하여 실무현장에서 적용할 수 있는 모델을 제시하고자 한다.

2. 헬리컬 밀링 가공

헬리컬 밀링 가공은 공구의 자전(Rotation)과 공전(Revolution)을 수반하는 복합가공이다. 이때 공구가 공전하면서 축 방향으로 전진하면서 가공하는 특징을 가지고 있다. Fig. 1에서 공작물의 가공하고자 하는 홀 직경을 $\varnothing D_w$, 공구의 직경은 $\varnothing D_t$ 로 각각 나타내었으며 공구가 공전하면서 축 방향으로 이송하는 양을 H_p 로 표시하였다. 먼저 엔드밀의 자전운동에서 접선방향 속도(v_{tt})는 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 f_{tt} 는 엔드밀의 날 당 이송을 의미하며 z 는 엔드밀의 날 수, 그리고 n 은 엔드밀의 회전수를 나타낸 것이다^[6].

$$v_{tt} = f_{tt} \cdot z \cdot n \quad (1)$$

엔드밀의 접선방향의 속도(v_{tt})를 공작물의 직경 대비 헬릭스 가공 경로 직경의 비율로 축소하면 헬릭스 밀링 가공 상의 접선속도를 식(2)와 같이 구할 수 있다.^[6]

$$v_{ht} = v_{tt} \frac{\varnothing D_h}{\varnothing D_w} \quad (2)$$

엔드밀의 헬리컬 가공에서 축 방향 속도(v_{ha})는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 f_{za} 는 엔드밀의 날 당 축 방향 이송을 나타낸 것이다.^[6]

$$v_{ha} = f_{za} \cdot z \cdot n \quad (3)$$

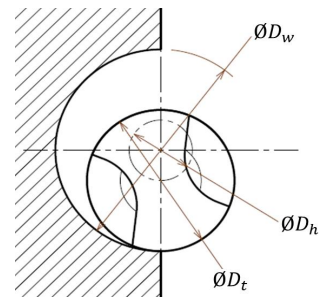


Fig. 1 Schematic diagrams of helical milling

식(2)와 식(3)을 토대로 엔드밀의 헬리컬 가공속도(v_h)는 식(4)와 같이 정리할 수 있다.^[6]

$$v_h = \sqrt{v_{ht}^2 + v_{ha}^2} \quad (4)$$

이와 같이 헬리컬 가공 속도는 엔드밀의 형상, 절삭조건(회전수, 이송, 공전 시 축 방향 이송)과 가공 직경에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 특히 엔드밀의 절삭조건은 작업자가 직접 조절이 가능한 부분이므로 표면거칠기와의 연계성을 확인할 필요가 있다. 이를 통해 작업자가 표면거칠기를 미리 예측하여 절삭조건을 결정할 수 있다면 생산공정보다 효율적으로 설계할 수 있을 것이다.

3. 실험

본 연구를 수행하기 위해 사용된 공작물은 알루미늄합금 중 구조용으로 널리 사용되는 AL6061-T4를 대상으로 하였으며 화학적 구성은 Table 1과 같다. Fig. 2는 공작물의 가공형상을 나타낸 도면이며 2개의 공작물에 각각 40개의 구멍을 각기 다른 절삭조건으로 가공하여 80개의 데이터를 획득하였다.

Table 1 Chemical composition of AL6061-T4(wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.40	0.7	0.15	0.15	0.80	0.04	0.25	the
~0.80	less	~0.40	less	~1.20	~0.35	less	rest

Table 2 Cutting condition(wet cutting)

RPM	Rotational feed (Table feed, mm/min)	Revolitional feed (H_p , mm)
1700~6500	220~870	0.3~3.3

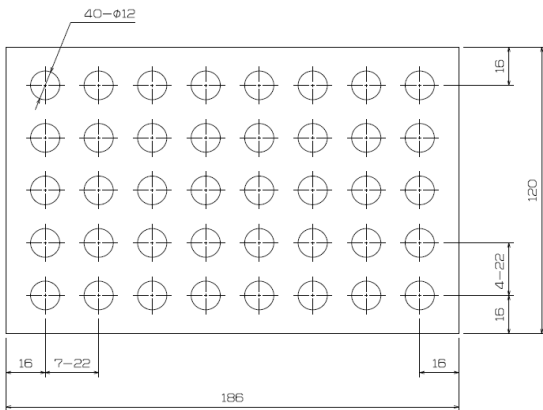


Fig. 2 Drawing of workpiece

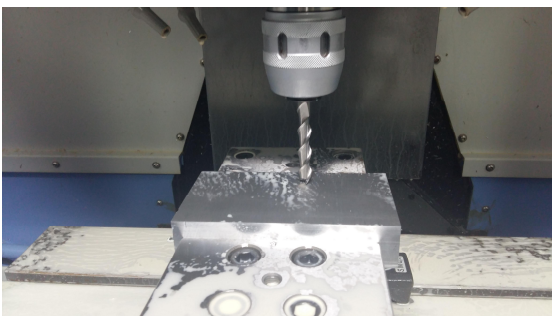


Fig. 3 Cutting tool and workpiece

또한 가공 시 공작물의 변형을 방지하기 위해 두께는 30mm로 하였다. 알루미늄합금을 가공하기 위해서는 전용 절삭공구가 필요하다. 특히 구성인선을 방지하기 위해서는 강(Steel)을 가공하는 공구와는 달리 날 끝부분이 매우 날카롭게 제작되어야 하

며 칩 배출이 원활한 형상을 채택하여야 한다. 이에 본 실험에서는 Fig. 3과 같이 대구택(TaeguTec)사의 2날 Ø10 플랫 엔드밀인 AES2100XL을 채택하였다. 가공 조건은 Table 2와 같으며 각 홀마다 조건 내에서 중복되지 않도록 불규칙하게 적용하였다. 그리고 본 실험은 절삭유를 공급하는 습식가공으로 실험을 진행하였다.

4. 표면거칠기 예측모델

4.1 상관분석

상관분석(Correlation analysis)은 두 변수간의 관련성을 분석하기 위해 사용하는 통계적 방법이다. Fig. 4, Fig. 5, 그리고 Fig. 6은 각 요인별로 데이터의 산점도(Scatter plot)를 나타낸 것이다. 3개의 독립변수(RPM, Table Feed, H_p)에 대해 종속변수와의 관계가 비교적 양의 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

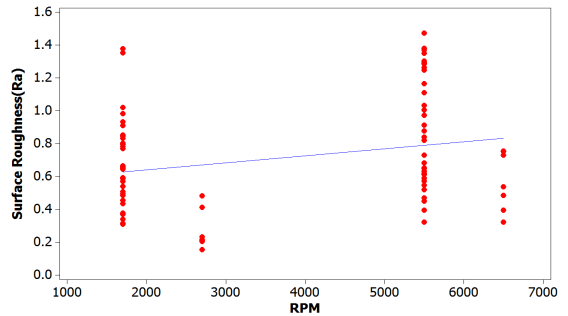


Fig. 4 Scatterplot of surface roughness vs RPM

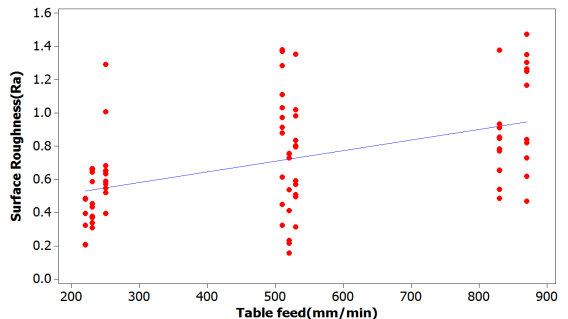


Fig. 5 Scatterplot of surface roughness vs table feed

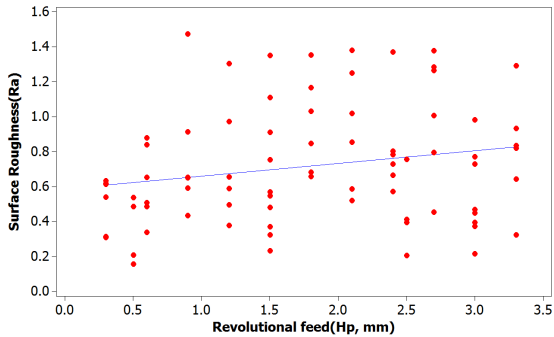


Fig. 6 Scatterplot of surface roughness vs H_p

Table 3 Correlation analysis

Factors	Pearson correlation	P-Value
Surf. vs RPM	0.249	0.026
Surf. vs Table Feed	0.464	0.000
Surf. vs H_p	0.205	0.068

Table 4에서는 상관분석 결과를 나타내고 있으며 표면거칠기와 이송과의 상관관계가 가장 높다. 그리고 엔드밀의 회전수(RPM)는 표면거칠기와 상관 계수(Pearson correlation)가 다소 낮으나 P검증 결과 유의한 인자임을 알 수 있으며 엔드밀의 공전 시 축 방향 이송(H_p)은 통계적으로 표면거칠기와 의 관련성이 낮음을 나타내고 있다.

4.2 회귀분석

예측 모형을 가정하고 실험 데이터로부터 모형의 적합성을 검증하고 변수들 간의 관련성을 파악하기 위해 회귀분석(Regression analysis)을 실시하였다. 먼저 3개의 독립변수에 대해 회귀분석을 실시 한 결과 추정된 회귀모형은 식(5)와 같다. 여기서 예측된 표면거칠기, RPM, 이송, H_p 는 각각 P_{Ra1} , α , β , γ 로 표시하였다. 모형의 결정계수(R^2)는 32.0%이며 Table 4에서와 같이 회귀계수의 t-검정 결과 상수를 제외하고 모두 유의수준 0.05에서 유의하다. Table 6은 회귀모형에 대한 분산분석(Analysis of Variance)을 실시한 결과를 나타내고 있다. 유의수준 0.05에서 추정된 회귀모형은 표면거칠기를 예측하는데 적합하다고 볼 수 있다.

$$P_{Ra1} = 0.1 + 0.000045\alpha + 0.00064\beta + 0.0682\gamma \quad (5)$$

다음으로 상관분석 결과 가장 관련성이 낮은 인자인 공전 시 축 방향 이송(H_p)을 제외하고 회귀모형(P_{Ra2})을 식(6)과 같이 구축하였다.

$$P_{Ra2} = 0.218 + 0.000045\alpha + 0.000647\beta \quad (6)$$

두 번째 모형의 결정계수(R^2)는 28.3%로 나타났으며 Table 6에서와 회귀계수의 t-검정 결과 첫 번째 모형과는 달리 모든 인자가 유의수준 0.05에서 유의하다. Table 7의 분산분석 결과 역시 유의수준 0.05에서 추정된 회귀모형은 표면거칠기를 예측하는데 적합하다고 볼 수 있다.

Table 4 Regression coefficient analysis

Predictor	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	0.1	0.1128	0.88	0.379
α	0.000045	0.000016	2.76	0.007
β	0.000640	0.000130	4.91	0.000
γ	0.0682	0.03333	2.05	0.044

Table 5 Analysis of variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	2.8352	0.9451	11.94	0.000
Residual Error	76	6.0162	0.0792		
Total	79	8.8514			

Table 6 Regression coefficient analysis

Predictor	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	0.21843	0.09876	2.21	0.030
α	0.000045	0.000016	2.69	0.009
β	0.000647	0.000133	4.87	0.000

Table 7 Analysis of variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	2.5034	1.2517	15.18	0.000
Residual Error	77	6.3480	0.0824		
Total	79	8.8514			

5. 예측모델의 성능 평가

예측모델의 성능평가를 위해 Table 8과 같이 절삭조건 범위를 선정하고 각기 다른 조건으로 16개 홀을 가공 후 표면거칠기를 측정하였다. 특히 예측모델을 구현하는데 사용하였던 가공조건보다 더 확장하여 모델의 범용성을 판단하고자 하였다. Fig. 7은 측정치와 예측치를 나타낸 결과이다. 측정치와 예측치 간에 다소 오차가 있지만 절삭조건에 따른 표면거칠기 값의 분포 경향이 유사하게 형성됨을 알 수 있다.

예측모델의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 식 (7)과 같이 평균제곱오차(Mean Squared Error, MSE)를 적용하여 그 결과 값을 Table 9에 나타내었다. 평균제곱오차를 토대로 식(5)에 의한 예측모델이 정확도가 높다는 것을 알 수 있으며 엔드밀의 공전시 축 방향 이송(H_p)을 인자로 채택하는 모델이 예측력이 높다고 할 수 있다.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - r_i)^2 \quad (7)$$

n : hole number
 p_i : prediction value
 r_i : test value

Table 8 Cutting condition for test(wet cutting)

RPM	Rotational feed (Table feed, mm/min)	Revolitional feed (H_p , mm)
800~9000	220~4100	0.3~4

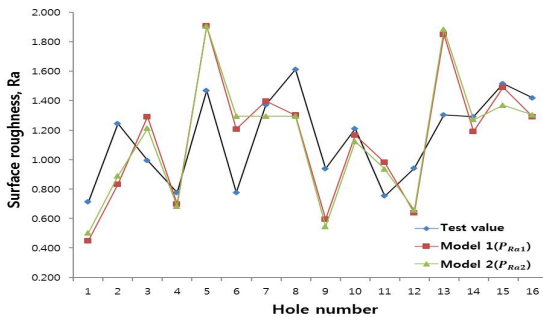


Fig. 7 Test value vs prediction value

Table 9 Mean squared error of prediction models

Model	MSE
Eq.(5), P_{Ro1}	0.0871
Eq.(6), P_{Ro2}	0.0899

6. 결론

본 연구에서는 엔드밀을 이용한 홀 가공 시 생산성 향상을 위해 표면거칠기를 예측하고자 하였다. 알루미늄합금 중 구조용으로 널리 사용되는 AL6061-T4를 헬리컬 가공으로 홀을 형성하는 실험을 실시하였다. 측정된 결과를 바탕으로 변수 간 관련성을 검토하기 위해 상관분석을 하였으며 회귀분석 기법을 도입하여 예측모델을 구축하고 평가하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 헬리컬 가공으로 홀 형성 시 표면거칠기에 가장 영향을 많이 미치는 변수는 이송이며 다음으로 엔드밀의 회전수이다.
2. 엔드밀의 축 방향 이송은 표면거칠기에 영향을 미치는 영향이 다른 두 변수에 비해 작지만 예측모델을 구축하는데 있어서는 정확도를 높이는 인자이다.

REFERENCES

1. Strenkowski, J. S., Hsieh, C. C., and Shih, A. J., "An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, Issues. 12-13, pp. 1413-1421, 2004.
2. Wang, D. H., and Yun, K. S., "Characteristics of Tool Deflection of Ball-end Mill Cutter in Pencil Cutting of the Corner," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 123-129, 1999.
3. Chun, S. H., "Effects of cutting condition on surface roughness in the spiral up milling of

- aluminum alloy,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 4, pp. 83-90, 2014.
4. Choi, S. Y., Kwon, D. G., Park, I. S., and Wang, D. H., “A Study on Cutting Forces and Tool Deformation when Flat-ended Pocket Machinig,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 2, pp. 28-33, 2017.
 5. Zao, Q., Qin, X., Ji, C., Li, Y., Sun, D., and Jin, Y., “Tool life and hole surface integrity studies for hole-making of Ti6Al4V alloy,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 79, Issue 5-8, pp. 1017-1026, 2015.
 6. Pereira, R. B. D., Brandão, L. C., Paiva, A. P., Ferreira, J. R., and Davim, J. P., “A review of helical milling process,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 120, pp. 27-48, 2017.