

AL7075-T6의 슬롯가공 시 표면거칠기와 진동의 상관관계에 관한 연구

천세호*[#]

*계명문화대학교 기계과

Correlation between Surface Roughness and Vibration in Slot Milling of AL7075-T6

Se-Ho Chun*[#]

*Department of Mechanical Engineering, Keimyung College University

(Received 09 March 2022; received in revised form 25 March 2022; accepted 04 April 2022)

ABSTRACT

This study investigated the characteristics and relationship between surface roughness and vibration according to the cutting conditions in the slot milling of AL7075-T6. The spindle speed, feed, and depth of cut were selected as independent variables and the amplitude of acceleration and surface roughness as dependent variables. Feed affected the surface roughness. As the spindle speed increased, the amplitude of vibration increased in the direction perpendicular to the feed direction. In addition, the amplitude of vibration and surface roughness showed a negative correlation. Under a given feed, the surface roughness improved as the vibration increased.

Keywords : Slot Milling(슬롯가공), Vibration(진동), Surface Roughness(표면거칠기), Full Factorial Design(완전요인설계)

1. 서론

슬롯가공(Slot Milling)은 공구의 축 방향, 반경 방향 절삭날(Cutting Edge) 모두 공작물에 삽입되어 가공하는 방식이다. 주로 엔드밀(Endmill)을 사용하며 길고 가느다란 공구의 형상적 특성으로 인해 가공 중 진동의 영향에 민감하다. 공구의 진동은 가공조건에 따라 그 정도가 달라지며 공작물의 품질에 많은 영향을 미친다. 일반적으로 슬롯가공의 경

우 깊고 가느다란 형상을 생성하기 때문에 연삭이나 2차 가공이 어려워므로 한 번의 가공으로 요구 조건을 만족해야 한다. 이에 공작물의 특성에 따른 적절한 가공조건 선정은 중요한 연구과제라 볼 수 있다.

산업용 알루미늄 합금(AL5052, AL7075) 슬롯가공에 관한 최근 연구^[1]에 따르면 엔드밀의 세장비(Slenderness Ratio)가 진동과 가공 품질에 영향을 미치는 인자임을 규명하였다. 특히 공구 진동으로 인한 실제 절입량(Depth of Cut, *mm*)의 변화는 생산비의 증가를 불러오는 요인이 될 수 있으며 알루미늄 합금의 종류에 따라 가공 특성이 다르게 나타남을

Corresponding Author : chunsh@kmcu.ac.kr

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

알 수 있다.

AL7075의 표면거칠기(Surface Roughness) 형성에 관한 연구^[2,3]에서는 이송 속도(Table Feed, *mm/min*)가 증가할수록 표면품질이 낮아졌는데 이는 날 당 부하 증가에 따른 진동 때문이라고 해석하였으며 주축 회전수와 이송 속도가 표면거칠기 형성에 영향을 미치는 유의한 인자임을 실험을 통해 밝혔다. 이들 연구에 의하면 절삭조건이 가공 중 진동 발생에 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있다.

엔드밀을 활용한 밀링 가공에서 절삭조건 변화에 따른 진동 발생에 관한 선행연구^[4-9]에서는 진동 가속도 신호를 활용하여 최적 가공조건을 탐색하였는데 특히 측벽가공을 위주로 연구를 진행하였다. 또한 개별 요인의 효과를 정량적으로 파악하기 위해서 실험계획법(Design of Experiment)을 적용하여 분석하였다.

슬롯가공의 경우 측벽가공과는 달리 절삭날이 이송 방향의 양 측면으로 공작물에 막혀있어 진동 형태가 선행연구^[4-9]와는 다른 양상일 것으로 예측되며 표면거칠기에 미치는 영향도 살펴볼 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 절삭조건에 따른 표면거칠기와 진동과의 관계를 정량적으로 파악하기 위해 실험계획법의 일종인 완전요인설계(Full Factorial Design)를 적용하여 AL7075-T6의 슬롯가공에서 절삭조건 변화에 따른 표면거칠기와 진동과의 관계를 파악하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험설계

본 연구에서는 절삭조건에 따른 표면거칠기와 진동과의 관계를 알아보려고 함이 목적이므로 독립변수는 주축 회전수(Revolution per Minute, *rpm*), 날 당 이송(Feed per Teeth, *mm/teeth*), 그리고 절입깊이(Depth of Cut, *mm*)를 선정하였다. 그리고 산술평균 거칠기(Arithmetic Mean Deviation, Ra)값과 진동가속도의 크기(m/s^2)를 종속변수로 하여 실험을 설계하였다. 어떤 독립변수가 종속변수에 가장 강하게 영향을 미치는지를 확인하고 독립변수 간의 영향을 정량적으로 파악하고자 실험계획법 중 완전요인설계를 적용하였다.

Table 1은 2수준(Level -1, 1)에서 중앙점(Level 0)을 포함한 실험설계이다. 높은 절삭열로 인해 공작물 연화가 발생하면 절삭날에 영향을 줄 수 있으므로 이를 최소화하기 위해 저속영역에서 절삭조건을 선정하였다. 또한 날 당 이송량을 통해 한 날에 작용하는 절삭단면적 변화가 종속변수에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 그리고 절입깊이는 예비실험을 통해 채터(Chatter) 발생 없이 안정적으로 가공이 가능한 영역을 탐색하여 범위를 선정하였다.

Table 1 Cutting conditions for experiment

Factors		Level		
		-1	0	1
Spindle Speed (<i>rpm</i>)	A	1,500	2,000	2,500
Feed (<i>mm/teeth</i>)	B	0.05	0.13	0.21
Depth of Cut (<i>mm</i>)	C	0.5	1.0	1.5

Table 2 Experiment design

Order No.	A	B	C
1*	0	0	0
2*	0	0	0
3	1	-1	-1
4*	0	0	0
5	-1	-1	-1
6	1	1	1
7	-1	1	-1
8*	0	0	0
9	1	-1	1
10	-1	1	1
11	-1	-1	1
12*	0	0	0
13	1	1	-1
14*	0	0	0

*center point

Table 2는 완전요인설계에 의한 실험계획을 나타내었고 실험순서의 무작위화(Randomization)를 통해 3개의 독립변수 외에 외부 인자가 실험에 끼치는 영향을 상쇄시켰다. 또한 6개의 중앙점(Center Point)을 두어 곡면성(Curvature) 탐지와 변동의 추정, 그

리고 검정력을 증가시키도록 하였다.

2.2 진동 및 표면거칠기 측정

Fig. 1에서는 공작물, 공구의 가공경로(Toolpath), 그리고 진동센서의 위치를 나타내었다. 공작물은 엔드밀의 이송 방향(x-direction)으로 양 측면을 고정(Clamping)하도록 하였다. 3 Axis MEMS 가속도센서(ADXL335, Analog Device, Inc.)를 테이블 위에 설치하고 디지털 신호를 획득하였다. 그리고 밀링머신(T4000™, Doosan Machine Tools)에 직경 10mm, 2날 비코팅 엔드밀(DAE2100M DC210, Duracarb)을 장착 후 건식가공으로 실험을 진행하였다. 엔드밀의 돌출길이(Overhang Length)는 선행연구^[1]를 참고하여 세장비(Slenderness Ratio) 3으로 설정하였다.

실험계획에 따라 가공 완료된 시편을 세척 후 표면거칠기 측정장비(Surfest SJ-310, Mitutoyo)를 통해 측정하였다. 측정 시 설정된 조건은 Table 3과 같으며 각 실험조건에 따른 가공표면을 3회 반복 측정 후 평균값을 반응치로 채택하였다.

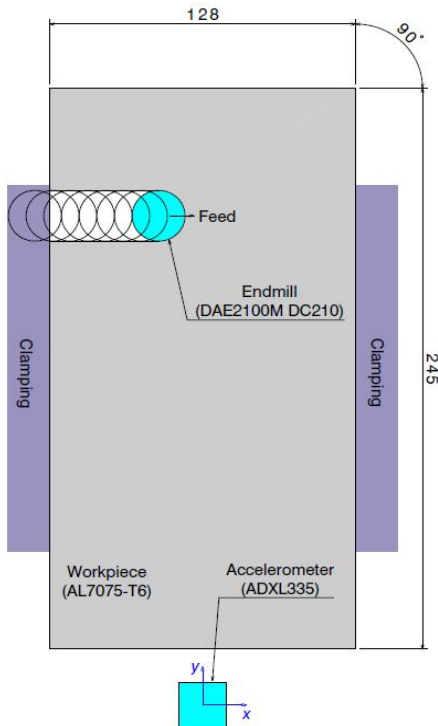


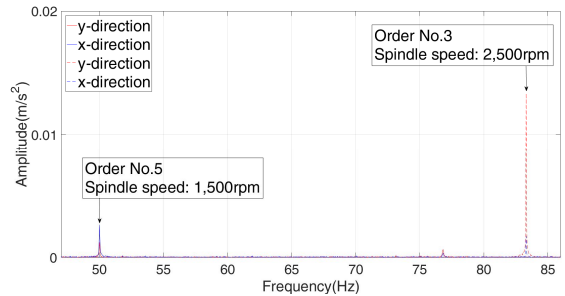
Fig. 1 Experimental setup for vibration measurement

Table 3 Specification of measuring instrument

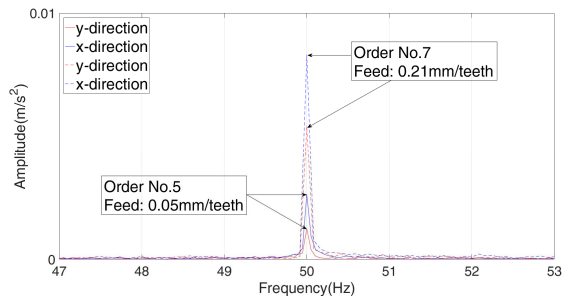
Item	Specification	
Parameter	Ra(μm)	
Filter	Gauss	
Measuring speed	0.5mm/s	
Number of sampling length	5	
Cutoff value	λ_c	0.8mm
	λ_s	2.5 μm

3. 실험결과 및 고찰

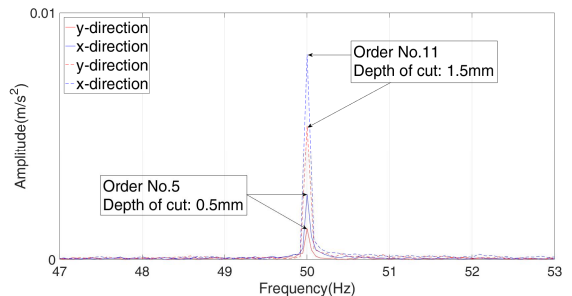
3.1 진동신호 특성



(a) Acceleration spectrum(Order No. 3 vs 5)



(b) Acceleration spectrum(Order No. 5 vs 7)



(c) Acceleration spectrum(Order No. 5 vs 11)

Fig. 2 Acceleration spectrum analysis

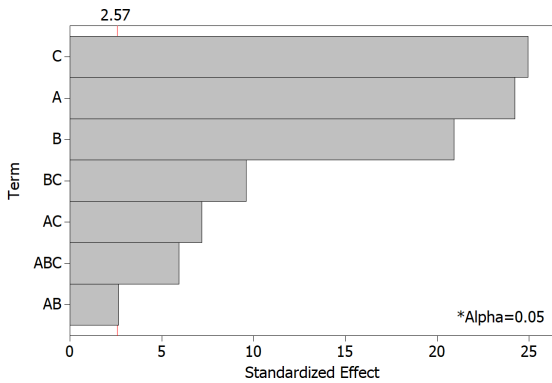


Fig. 3 Pareto Chart of the Standardized Effects

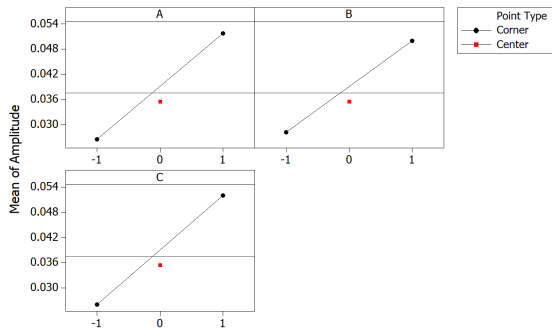


Fig. 4 Main effects plots for vibration amplitude

Fig. 2에서는 절삭조건 변화에 따른 진동신호의 거동을 살펴보기 위해 주파수 영역에서 검토하였다. 주축 회전수, 이송, 그리고 절입깊이가 증가할수록 신호의 크기가 모두 증가하였으며, 특히 주축 회전수 증가는 엔드밀 이송의 직각 방향(y-direction) 신호를 급격하게 증가시키는 요인임을 알 수 있다.

Table 4 Analysis of variance(Alpha=0.05)

Source	DF	SS	MS	F	P
Main Effects	3	0.00359778	0.00119926	549.00	0.000
2-Way Interactions	3	0.0003298	0.00010995	50.34	0.000
3-Way Interactions	1	0.0000767	0.00007676	35.14	0.002
Curvature	1	0.00004500	0.00004500	20.60	0.006
Residual Error	5	0.00001092	0.00000218		
Pure Error	5	0.00001092	0.00000218		
Total	13	0.00406033			

이러한 현상은 주축 회전수 2,500rpm에서도 동일하게 관측되었는데 주축 회전수 변화가 진동의 크기뿐만 아니라 방향 변화에도 관여하고 있다는 것을 알 수 있다. 다음으로 Fig. 3의 Pareto chart를 통해 신뢰수준(95%) 내에서 진동신호 크기변화에 미치는 유의한 요인을 분석하였다. 모든 요인이 진동신호 크기변화에 영향을 미친다고 볼 수 있으며 그 중 절입깊이의 영향력이 가장 크다. 교호효과(Interactions)를 제외하고 절삭조건에 따른 진동신호 크기변화의 방향을 분석하기 위해 주효과 분석을 하였으며 그 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 각 요인별 수준이 증가함에 따라 진동신호의 크기도 정방향으로 증가하여 양의 상관관계가 있음을 알 수 있다. 다음으로 Table 4에서 나타난 것과 같이 분산분석을 통해 주효과, 교호효과, 그리고 곡면성 모두 95% 신뢰수준에서 유의한 요인임을 정량적으로 알 수 있으며 곡면성이 검출되는 것으로 보아 절삭조건이 증가할수록 진동신호는 비선형적으로 증가함을 추론할 수 있다.

3.2 표면거칠기 특성

실험설계에 따라 가공된 시편의 표면거칠기를 측정하였으며 반응값에 영향력 정도를 요인별로 분석하였다. Fig. 5에 제시된 Pareto chart를 살펴보면 이송만이 신뢰수준(95%) 내에서 유의한 인자임을 알 수 있고 나머지 인자는 영향력이 미미함을 알 수 있다.

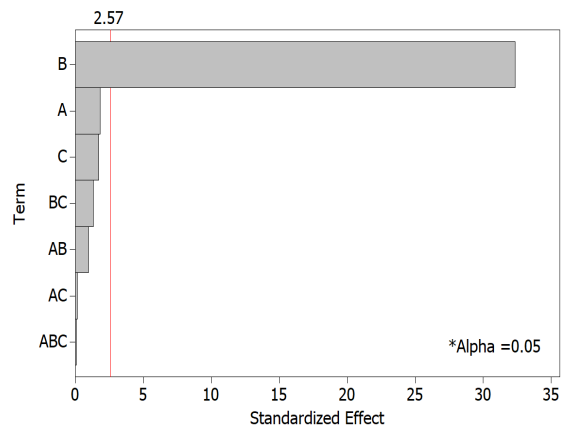


Fig. 5 Pareto chart of the standardized effects

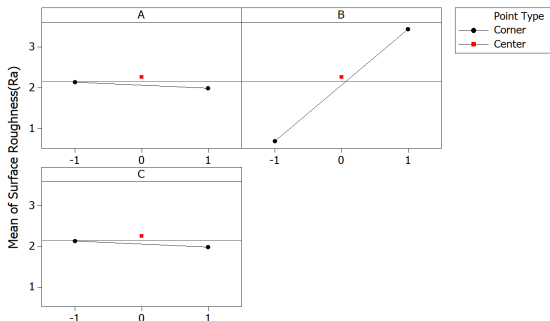


Fig. 6 Main effects plots for surface roughness

Table 5 Analysis of variance(Alpha=0.05)

Source	DF	SS	MS	F	P
Main Effects	3	15.2292	5.07638	351.19	0.000
2-Way Interactions	3	0.0390	0.01301	0.90	0.503
3-Way Interactions	1	0.0001	0.00008	0.01	0.944
Curvature	1	0.1432	0.14321	9.91	0.025
Residual Error	5	0.0723	0.01445		
Pure Error	5	0.0723	0.01445		
Total	13	15.4837			

Table 6 Pearson correlation analysis

Level	Correlations (Ra and Vibration Amplitude)	
Feed (mm/teeth)	-1	-0.989 p-value=0.011
	0	-0.826 p-value=0.043
	1	-0.918 p-value=0.082

Fig. 6는 주효과 분석을 나타낸 것으로서 이송이 증가함에 따라 표면거칠기도 증가함을 알 수 있다. 한편 주축 회전수와 절입깊이는 수준이 증가함에 따라 표면거칠기 값이 하락하는 음의 상관관계가 관찰되는데 이들 인자의 영향력이 신뢰수준에서 벗어나 이에 대한 효과를 판단하기는 어렵다. 그리고 Table 5의 분산분석 결과 교호작용에 대한 효과는

낮으며 곡면성이 탐지되는 것으로 보아 절삭조건 변화, 특히 이송과 표면거칠기는 비선형적인 관계가 있음을 판단할 수 있다.

3.3 표면거칠기와 진동의 상관관계

표면거칠기 변화에 영향을 미치는 인자는 이송을 정량적 분석을 통해 판단할 수 있으며 이송 수준에 따른 표면거칠기와 진동의 상관관계를 고찰할 필요가 있다. 이에 각 이송 영역에서의 진동신호의 크기와 표면거칠기의 상관관계분석을 실시하였고 그 결과는 Table 6과 같다. 분석결과 동일한 이송조건에서 표면거칠기와 진동은 음의 상관관계가 있음을 판단할 수 있다. 그러므로 표면거칠기를 향상시키기 위해서는 낮은 이송조건에서 주축 회전수와 절입깊이를 증가시켜 진동을 증가시킬 수 있도록 해야 함을 알 수 있다.

4. 결론 및 과제

AL7075-T6의 슬롯가공에서 절삭조건 변화에 따른 진동 특성을 살펴보고 표면거칠기와의 관계를 요인별로 파악하기 위해 실험계획법을 적용하여 정량적으로 분석하였다. 주축 회전수, 이송, 그리고 절입깊이를 독립변수로 선정하고 진동가속도와 표면거칠기 값을 종속변수로 하여 각 실험조건에 따른 반응치를 측정하고 분석하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 알루미늄 합금 AL7075-T6의 건식 슬롯가공에서 진동의 크기와 표면거칠기에 영향을 미치는 인자는 이송이다.
2. 주축 회전수와 절입깊이는 진동의 크기에 영향을 주는 인자이지만 표면거칠기에 미치는 영향은 미미하다.
3. 주축 회전수가 증가할수록 공구이송의 직각 방향으로 진동의 크기가 증가하므로 공작물의 고정시 이를 고려해야 한다.
4. 진동의 크기와 표면거칠기 측정값은 음의 상관관계를 가지며 같은 이송조건에서는 진동이 증가할수록 표면거칠기 측정값은 감소한다.
5. 본 연구는 건식가공으로 수행되었으며 습식조건

에서도 표면거칠기와 진동의 상관관계에 관한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Park, H. M., Park, H. C., Son, H. J., Jung, Y. G., and Jung, Y. G., "A Study on the Cutting Criteria and Cutting Characteristics Considering the Tool Slenderness Ratio for 7075 Aluminum Alloy," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 12, No. 4, pp. 40-46, 2013.
2. Park, E. S., "A Study on Surface Roughness of Al alloy 7075 to Cutting depth in High-speed Machining," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 9, No. 6, pp. 29-35, 2010.
3. Cho, Y. S., and Park, H. S., "Prediction of Surface Roughness of Al7075 on End-Milling Working Conditions by Non-linear Regression Analysis," *Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol. 26, No. 6, pp. 329-335, 2010.
4. Hong, D. K., Park, J. W., Baek, H. S., and Ahn, C. W., "Vibration Characteristics by Manufacturing Condition in Side Wall End Milling of Al7075," *Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 266-270, 2008.
5. Hong, D. K., Kim, D. Y., and Ahn, C. W., "The Study on the Optimal Working Condition for Vibration, Surface Roughness and Cutting Temperature in End-milling," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 1322-1329, 2004.
6. Hong, D. K., Ahn, C. W., Park, J. W., and Baek, H. S., "Optimum Working Condition of Al 2024 Alloy in Side Wall End Milling," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 7, No. 4, pp. 37-43, 2008.
7. Choi, J. G., Park, J. W., Hong, D. K., and Ahn, C. W., "A Study on Optimum Manufacturing Condition of End Mill Using Response Surface Methodology," *Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 119-124, 2007.
8. Choi, J. G., Park, J. W., Hong, D. K., and Ahn, C. W., "Optimal Manufacturing Condition of Side Wall End Milling Using Vibration Acceleration and Surface Roughness," *Proceedings of Korean Society for Precision Engineering*, pp. 281-282, 2007.
9. Hong, D. K., Choi, J. G., Park, J. W., Baek, H. S., and Ahn, C. W., "Optimum Working Condition of Side Wall End Milling Using Response Surface Methodology," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 11, pp. 1097-1104, 2008.