알루미늄 합금 7075의 표면 거칠기에 미치는 고속가공의 최적 절삭 깊이에 관한 연구

배 명 환^{*1)} · 박 형 렬²⁾ · 정 화³⁾

경상대학교 기계설계학과^{*1)} · 경상대학교 대학원²⁾ · 한국폴리텍대학 진주캠퍼스 컴퓨터응용기계과³⁾

A Study on the Optimal Cutting Depth upon Surface Roughness of Al Alloy 7075 in High-speed Machining

Myung-whan Bae^{*1)} · Hyeong-yeol Park²⁾ · Hwa Jung³⁾

^{*1)}Department of Mechanical Engineering for Production, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

²⁾Graduate School, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

³⁾Computer Applied Mechanical Department, Jinju Campus of Korea Polytechnic, Jinju 660-996, Korea

(Received 20 August 2012 / Revised 3 March 2013 / Accepted 25 March 2013)

Abstract : The high-speed machining in the manufacturing industry field has been widely applied for parts of vehicles, aircraft, ships, electronics, etc., recently, because the effect of cost savings for shortening processing time and improving productivity is great. The purpose in this study is to investigate the effect of cutting depth on the surface roughness of workpiece with the spindle rotational speed and feed rate of high-speed machines as a parameter to find the optimal depth in the finishing for ball end mill of the aluminum alloy 7075 which is used much in aircraft parts. When the cutting depth for the respective feed rate and spindle rotational speed is varied from 0.1 mm to 0.7 mm at intervals of 0.2 mm in the wet finishing of the aluminum alloy 7075 by the insoluble cutting oils and high-speed machining used in the rough machining of previous study, the surface roughness values and the cutting temperature are measured. In addition, the cutting surface shapes of test specimens are observed by optical microscope and compared with respectively. It is found that the surface roughness values and the temperature generated during machining are increased as the feed rate and cutting depth are raised, but those are decreased as the spindle rotational speed is increased.

Key words : High-speed machining(고속가공), Surface roughness(표면 거칠기), Optimal cutting depth(최적 절삭깊이), Finish machining(정삭가공), Aluminum alloy 7075(알루미늄 합금 7075), Cutting temperature(절삭온도), Cutting surface shape(절삭표면 형상)

1. 서 론

최근 제품산업 현장에서 사용되고 있는 고속가공은 가공시간 단축, 생산성 향상 등에 있어서 비용절감 효과가 크기 때문에, 자동차, 항공기, 선박, 전자 등의 부품에 많이 적용되고 있다. 특히, 항공기의 부품은 대량생산이 아니고, 생산량이 한정된 소량의

주문생산이면서 부품의 종류가 수십만 가지로 많기 때문에 소량 다품종의 생산방식을 취하고 있다. 그런데 이러한 부품은 고도의 신뢰성과 안정성이 요구되고 있기 때문에 부품제작 시에 초정밀가공이 이루어지고 있다. 현재, 초고속 주축의 개발로 초정밀가공에 사용되는 고속 가공기는 회전속도 20000 rpm에서 50000 rpm의 초고속 주축이 탑재되어 사용하고 있다.¹⁾

*Corresponding author, E-mail: mwbae@gnu.ac.kr

Shaw²⁾는 공구수명과 가공면의 표면 거칠기에 영

향을 미치는 절삭변수인 주축 회전속도와 이송속도의 최적조건을 제시하였고, Greenhow 등³⁻⁶⁾은 절삭가공에서 주축 회전속도가 높을수록 잔류응력과 표면 거칠기가 감소하고, 절삭공구 날의 이송속도가 작을수록 표면 거칠기가 감소한다고 하였다.

현재, 항공기 부품을 생산하고 있는 많은 기업체들은 생산성 향상을 위해 고가의 고속가공기를 도입하여 사용하고 있지만, 정확한 고속가공의 조건을 산출하지 못해 경험에 의한 절삭조건을 부여하여 제품을 절삭하고 있다. 정삭의 경우에는 너무 빠른 속도로 절삭을 하면 커شط 높이가 상승하여 제품의 품질이 떨어지고, 너무 느린 속도로 절삭을 하면 절삭열에 의해 절삭유가 용착되어 가공품을 사용할 수 없는 경우가 발생한다. 따라서 적절한 절삭조건과 동시에 표면에 용착되는 온도를 찾아 가공품의 불량률을 예측하고 최적의 절삭 깊이를 찾아내는 것이 필요하다.

절삭가공은 크게 황삭(rough machining)과 다듬질가공인 정삭(finish machining)으로 구분된다. 그런데 강재의 가공표면 거칠기에 관한 절삭가공의 연구는 많이 있지만, 항공기 부품에 널리 사용되고 있는 알루미늄 합금의 고속 볼 엔드밀 절삭조건에 따른 표면 거칠기 특성에 관한 연구는 국내에서 아직까지 미진한 상태이다.

본 연구에서는 최근 항공기 부품에 많이 사용되고 있는 알루미늄 합금 7075의 볼 엔드밀 정삭 절삭가공에 의한 주축 회전속도와 이송속도를 파라미터로 하여 절삭 깊이가 가공물 표면 거칠기에 미치는 영향을 조사하고 최적의 절삭 깊이를 찾는 것이 목적이다. 이를 위해 이전 연구의 황삭가공⁷⁾에서 사용한 비수용성 절삭유와 고속 가공기를 이용하여 최대 절삭 깊이 0.7 mm까지 습식가공 중 발생하는 절삭가공온도와 가공 후 표면 거칠기 및 형상을 관찰하고 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 알루미늄 합금 7075에 대한 고속 절삭가공의 절삭 깊이에 따른 최적 정삭조건을 고찰하기 위하여 실험에 사용된 고속 가공기는 국내 M

사에서 제작한 최대 주축 회전속도가 24000 rpm의 3축 수직형이고, 외부 냉각기를 이용한 수냉식 주축 냉각방식을 채택하고 있으며, 주요제원은 Table 1과 같다.

절삭공구는 D사에서 생산하고 있는 고속가공 알루미늄용 $\phi 12$ mm의 2날 볼 엔드밀(AEB2120S TT9 020)을 사용하였으며, 실험에 사용된 텅스텐-코발트 합금으로 코팅된 엔드밀의 형상과 제원은 Fig. 1과 Table 2에 나타내고 있다.

본 실험에 사용된 알루미늄 합금 7075는 알루미늄 합금 7000계열로서 기계적 성질이 대단히 우수한 구조용 경량소재로 기존 항공기 주재료인 2000계열보다 강도가 매우 높으며, 현재 알루미늄 합금 중 최고의 강도를 유지하고 있어 항공기용 고강도 및 내식성 재료로 널리 사용되고 있다.

절삭시험에 사용된 시험편은 강에 비해 중량이 가볍고 인장강도는 높아 항공기 부품에 널리 사용

Table 1 Specifications of high-speed machine

Items		Specification
Type		HSE-700S
Max. spindle speed (rpm)		24000
Max. feed rate (mm/min)		24000
Table size (mm)		650 × 700
Workpiece mass		3.92 kN
Controller		PC controller based on windows NT
Stroke	X axis (mm)	600
	Y axis (mm)	650
	Z axis (mm)	250

Fig. 1 Shape of high speed ball endmill

Table 2 Dimensions of high speed ball endmill (mm)

D	d	L	l	R
12	12	75	30.5	6

되고 있는 알루미늄 7075를 120 mm × 120 mm × 60 mm의 크기로 제작한 후, 절삭 깊이를 일정하게 하기 위해 편평도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마기로 연마하여 시험에 사용하였다. 시험편의 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 3 및 4에 나타내고 있다.

절삭가공 중 시험편과 공구냉각에 적용된 비수용성 절삭유⁽⁷⁾는 국내 K사의 고속가공 알루미늄용으로 본 연구에서는 물을 혼합하지 않은 100% 원액을 사용하였고, 물성값은 Table 5에 나타내고 있다.

2.2 실험방법

Fig. 2에서는 고속 가공기에 의한 시험편의 절삭 과정을 나타낸 것으로 전부하 가공시 시험편의 떨림을 방지하기 위해 시험편을 유압척에 견고하게 고정하여 절삭하였다.

Table 6에는 절삭조건을 나타내고 있는데, 주축 회전속도를 10000 rpm에서 20000 rpm까지 2000 rpm 간격으로, 이송속도는 2000 mm/min에서 20000 mm/min까지 2000 mm/min의 간격으로, 절삭 깊이는

Fig. 2 Cutting process of workpiece by high-speed machine

Table 6 Cutting conditions of high-speed machine

Cooling method	Non-soluble cutting oil
Spindle rotational speed (rpm)	10000, 12000, 14000, 16000, 18000, 20000
Feed rate (mm/min)	2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000, 14000, 16000, 18000, 20000
Cutting depth (mm)	0.1, 0.3, 0.5, 0.7

Table 3 Chemical compositions of Al alloy 7075(wt%)

Zn	Cu	Mg	Fe	Si	Cr	Mn	Ti	Al
6.1	2.0	0.8	0.5	0.4	0.35	0.2	0.2	balance

Table 4 Mechanical properties of Al alloy 7075

Ultimate tensile strength (MPa)	570
Yield tensile strength (MPa)	505
Elongation at break (%)	9
Elastic modulus (GPa)	72
Shear strength (MPa)	151.9

Table 5 Physical properties of insoluble cutting oil

Test items	Test method	Value
Specific gravity, @15/4 °C	ASTM D1298	0.8456
Color	ASTM D1500	10.5
Viscosity, @40 °C (cSt)	ASTM D445	11.77
Pour point (°C)	ASTM D97	-12.5
Flash point (°C)	ASTM D92	186
Corrosion (100 °C × 1 hr)	KS M2018	1a

0.1 mm에서 0.7 mm까지 0.2 mm간격으로 비수용성 절삭유에 의해 냉각시키면서 절삭가공 실험을 수행하였다.

Fig. 3에는 표면 거칠기 측정시스템을, Table 7에는 표면 거칠기 측정기의 주요제원을 나타내고 있다. 정확한 측정을 하기 위해 수준기로 수평을 맞춘 후에 컷오프 값은 0.8 mm로, 기준길이는 컷 오프 값의 5배인 4 mm로, 범위 값은 25 μ m로 설정하였으며, 가공된 시험편을 알코올로 세척한 후 측정테이블 위에 올려놓고 볼 엔드밀 중심부분에 절삭방향으로 이송장치를 작동시켜 측정하였다.⁸⁾

측정된 표면 거칠기 값은 증폭기 및 기록기를 통과하여 중심선 평균 거칠기(Ra), 10점 평균 거칠기(Rz) 및 최대높이(Rmax)로 환산한 다음, 그 중에서 중심선 평균 거칠기에 대해 5회 측정한 평균값을 데이터로 사용하였다.

절삭가공 중 시험편과 절삭공구에서 발생하는 열을 측정하기 위해 적외선 온도계의 초점을 절삭공구와 절삭이 이루어지는 시험편 부분에 정확히 맞

Fig. 3 Measuring instrument of surface roughness

Table 7 Specifications of surface roughness measuring instrument

Items	Specifications
Model	Mitutoyo SURF-TEST SV-414
Limit indication, Rmax (μm)	600
Cut off value (mm)	0.08 ~ 8
Basic range (mm)	0.25 ~ 8
Stylus force (N)	0.00392
Driving speed (mm/s)	0.02 ~ 1.2
Stylus tip radius (μm)	5

춘 후, 마그네틱으로 적외선 온도계를 주축에 고정시켜 온도를 측정하였는데, 이 때 사용한 휴대용 적외선 온도측정기의 주요제원은 Table 8에 나타내고 있다.

절삭공구에 의해 가공한 후, 시험편의 중심부 표면형상을 관찰하기 위해 광학현미경에 부착된 대물렌즈 10배율과 대안렌즈 10배율인 총 100배율의 표

Table 8 Specifications of infrared thermometer

Items	Specifications
Type	FLUKE 568
Temperature range ($^{\circ}\text{C}$)	-40 ~ 650
Accuracy ($^{\circ}\text{C}$)	± 1.0
Spectral response (μm)	8 ~ 14
Response time (s)	below 0.5
Minimum spot size (mm)	19
Communication	USB 2.0

면형상을 CCD 카메라로 컴퓨터의 측정프로그램(XT-measure)에 의해 이미지로 저장하였다. Table 9에는 광학현미경의 주요제원을 나타내고 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 표면 거칠기 특성

Fig. 4에서는 이송속도를 2000 mm/min부터 20000 mm/min까지 2000 mm/min간격으로, 절삭 깊이를 0.1 mm부터 0.7 mm까지 0.2 mm간격으로 변화시켰을 때 주축 회전속도에 따른 절삭면의 중심부에 대한 표면 거칠기 특성을 나타내고 있다.

그림으로부터 본 연구의 실험범위에 있어서 이송속도와 절삭 깊이가 증가하면 표면 거칠기 값이 증가되고, 주축 회전속도가 증가하면 표면 거칠기 값이 감소됨을 알 수 있다. 이것은 이송속도와 절삭 깊이가 증가되면 절삭공구 날당의 절삭량 증가로 인해 공구에 진동이 발생되어 절삭이 원활하게 이루어지지 않았을 뿐만 아니라, 과도한 절삭은 칩의 배출이 원활하게 이루어지지 않아 누름현상이 발생되었기 때문이다. 또한, 이것은 이론적으로 이송속도가 증가하게 되면 키슘 높이(Cusp height)가 증가되어 거칠기 값이 증가되는 것^{2,9)}과 유사한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 4 (a)와 (b)에서 이송속도 2000 mm/min부터

Table 9 Specifications of optical microscope

Items	Specifications
Model	Mitutoyo TF-510F
Travel of X and Y table (mm)	50, 50
Digital X, Y counter resolution (mm)	0.001, 0.005
Measuring accuracy (μm , @20 $^{\circ}\text{C}$)	3 + 0.02L (L = measuring length: mm)
Focusing distance (mm)	150
Surface illuminator lamp (No.)	2
Eyepiece magnification	$\times 10$, $\times 15$, $\times 20$
Objective lens magnification	$\times 1$, $\times 3$, $\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 50$, $\times 100$
Resolution of magnification (μm)	9.2($\times 1$), 3.9($\times 3$), 2.5($\times 5$), 1.5($\times 10$), 0.7($\times 20$), 0.5($\times 50$), 0.7($\times 100$)

Fig. 4 Effect of cutting depth on average surface roughness as a parameter of feed rate at the respective spindle rotational speed

8000 mm/min까지 각 주축 회전속도에 대한 표면 거칠기 값은 거의 동일하게 나타나고 있다. 절삭 깊이 0.3 mm까지 절삭량은 절삭공구 날당의 최대 절삭량보다 적기 때문에, 절삭 깊이 0.1 mm와 0.3 mm의 경우는 표면 거칠기 값이 거의 동일하게 나타나고 있다. 이것은 본 연구의 0.3 mm 이하에서 최적 절삭 깊이가 나타난 것으로, 그 이상 절삭 깊이에서는 표면 거칠기 값이 증가되고 있음을 그림에서 알 수 있다.

3.2 절삭열 특성

Fig. 5에서는 이송속도를 2000 mm/min부터 20000 mm/min까지 2000 mm/min 간격으로, 절삭 깊이를 0.1 mm부터 0.7 mm까지 0.2 mm 간격으로 변화시켰을 때, 절삭 중 시험편과 절삭공구에서 발생된 절삭온도를 주축 회전속도에 따라 나타내고 있다.

그림에 있어서 본 연구의 실험범위에 대한 이송

속도와 절삭 깊이가 증가하면 절삭 중 온도가 증가하는 반면, 주축 회전속도가 증가하면 절삭온도는 감소되고 있음을 알 수 있다. 이것은 앞에서 고찰한 표면 거칠기 값과 마찬가지로 이송속도와 절삭 깊이가 증가하면 절삭공구 날당의 절삭량이 증가하여 절삭온도가 증가하기 때문이다.

Fig. 5 (a)와 (b)에서 절삭 깊이 0.3 mm 이하의 이송속도 2000 mm/min과 4000 mm/min은 주축 회전속도에 관계없이 본 실험의 최저 절삭온도인 38℃를 나타내고 있는데, 이것은 실험당시의 주위온도 28℃보다 10℃ 정도 높은 것으로 시험편 절삭시 절삭유에 의한 윤활 및 냉각 작용 때문에 시험편과 절삭공구에 거의 열이 발생되고 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 절삭 깊이가 0.3 mm를 초과하면 주축회전속도의 증가에 따라 앞에서 고찰한 이유 때문에 절삭온도가 감소하지만, 어느 경우에도 주의온도 38℃

Fig. 5 Effect of cutting depth on cutting temperature as a parameter of feed rate at the respective spindle rotational speed

보다는 높음을 알 수 있다.

3.3 절삭표면 특성

Figs. 6 ~ 11에서는 이송속도가 2000 mm/min부터 20000 mm/min까지 4000 mm/min 간격과 주축 회전 속도 10000 rpm부터 20000 rpm 까지 2000 rpm 간격으로 절삭 후 시험편 중심부에 대한 절삭표면의 형상을 절삭 깊이에 따라 나타내고 있다.

그림의 절삭 깊이 0.5 mm 및 0.7 mm에서는 절삭 표면에 자국이 뚜렷하게 나타날 뿐만 아니라, 절삭 자국에 공구날의 절삭간격이 넓게 나타나고 있다. 절삭 깊이가 증가하면 절삭간격이 불완전하게 넓어져 커스 높이가 증가하게 되어 앞에서 고찰한 표면 거칠기 값이 증가하게 된다. 특히, 절삭 깊이 0.7 mm에서는 본 실험조건의 어떠한 경우에서도 불완전하

게 절삭되고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 합금 7075의 습식 정삭 절삭가공시에 각각 다른 조건의 이송속도와 주축 회전속도에서 절삭 깊이를 0.1 mm부터 0.7 mm까지 0.2 mm 간격으로 변화시켰을 때, 표면 거칠기 값 및 절삭온도를 측정하였고, 절삭 시험편의 표면형상을 광학현미경에 의해 관찰하고 비교하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

- 1) 이송속도와 절삭 깊이가 증가하면 표면 거칠기 값이 증가하였지만, 주축 회전속도가 증가하면 표면 거칠기 값은 감소하였다.
- 2) 이송속도와 절삭 깊이가 증가하면 절삭 중 발

(a) Cutting depth 0.1 mm, (a) Cutting depth 0.3 mm (c) Cutting depth 0.5 mm (d) Cutting depth 0.7 mm
Fig. 6 Cutting surface of workpiece by optical micrographs(feed rate 2000 mm/min and spindle rotational speed 10000 rpm)

(a) Cutting depth 0.1 mm, (a) Cutting depth 0.3 mm (c) Cutting depth 0.5 mm (d) Cutting depth 0.7 mm
Fig. 7 Cutting surface of workpiece by optical micrographs(feed rate 6000 mm/min and spindle rotational speed 12000 rpm)

(a) Cutting depth 0.1 mm, (a) Cutting depth 0.3 mm (c) Cutting depth 0.5 mm (d) Cutting depth 0.7 mm
Fig. 8 Cutting surface of workpiece by optical micrographs(feed rate 10000 mm/min and spindle rotational speed 14000 rpm)

(a) Cutting depth 0.1 mm, (a) Cutting depth 0.3 mm (c) Cutting depth 0.5 mm (d) Cutting depth 0.7 mm
Fig. 9 Cutting surface of workpiece by optical micrographs(feed rate 14000 mm/min and spindle rotational speed 16000 rpm)

(a) Cutting depth 0.1 mm, (a) Cutting depth 0.3 mm (c) Cutting depth 0.5 mm (d) Cutting depth 0.7 mm
Fig. 10 Cutting surface of workpiece by optical micrographs(feed rate 18000 mm/min and spindle rotational speed 18000 rpm)

(a) Cutting depth 0.1 mm, (a) Cutting depth 0.3 mm (c) Cutting depth 0.5 mm (d) Cutting depth 0.7 mm
Fig. 11 Cutting surface of workpiece by optical micrographs(feed rate 20000 mm/min and spindle rotational speed 20000 rpm)

생되는 절삭열의 온도는 증가한 반면, 주축 회전속도가 증가하면 절삭온도는 감소되었다.

3) 본 실험조건의 이송속도 및 주축회전속도에서는 절삭 깊이 0.3 mm에서 가장 낮은 표면 거칠기 값이 나타났고, 절삭열은 절삭 깊이 0.1 mm에서 가장 낮게 나타났다.

4) 절삭 깊이 0.5 mm와 0.7 mm에서는 가공면에 불완전 절삭자국이 뚜렷하게 나타났고, 절삭간격도 넓게 나타나 커스 높이가 증가되어 표면 거칠기 값이 증가되었다.

후 기

본 연구는 경상대학교 2단계 BK21 사업단(첨단 기계항공공급인력양성사업단) 및 공학연구원의 지원을 받아 수행되었다.

References

- 1) H. C. Han, Y. H. Gho, S. J. Yu and S. O. Kim, "High Speed Machining," The Korea Society for Aeronautical and Space Science Autumn Conference(I), pp.437-440, 2003.
- 2) M. C. Shaw, "Optimum Selection of Machine Tool: Speed and Feeds," International Journal Mech. Des. Res. Vol.5, pp.25-34, 1965.
- 3) J. N. Greenhow and C. Rubenstein, "The Dependence of Cutting Force on Feed and Speed in Orthogonal Cutting with Worn Tools," International Journal Mach. Tool Des. Res. Vol.9, pp.1-16, 1969.
- 4) H. Schulz and St. Hock, "High speed of Dies and Moulds Cutting Conditions and Technology," CIRP, Vol.43, pp.63-67, 1994.
- 5) E. Shamoto and Y. Hatinas, "Prediction of Shear Angle in Oblique Cutting with Maximum Shear Stress and Technology," Vol.1, ASME, pp.121-128, 1997.
- 6) R. Mustafizur and Md. S. Chowdhung, "Influence of Different Tool Materials on High Speed Machining of Hardened Tool Steel," The 5th International Conference on Die and Mould Technology, pp.25-30, 2000.
- 7) H. Y. Park, M. W. Bae, H. Jung and M. S. Kang, "Effect of Cooling Method on Surface Roughness in High-speed Machining," KSAE Annual Conference and Exhibition, pp.2679-2684(CD), 2010.
- 8) M. W. Bae, B. H. Park and H. Jung, "A Study on Improvement of Durability for Run-out Table Roller with Hot Rolling by Porous Self-fluxing Alloy Coating," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol.36, No.2, pp.276-285, 2012.
- 9) J. Wang, T. Kuriyagawa, X. P. Wei and D. M. Guo, "Optimization of Cutting Conditions for Single Pass Turning Operations Using a Deterministic Approach," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.42, pp.1023-1033, 2002.