論文 한국공작기계학회지 제9권 제3호 2000.6.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

Al합금의 고속가공에서 치수오차와 표면정도 추이 고찰

윤종학*, 정문섭**, 이헌철***

A Study on Transition of Dimension Error and Surface Precision in High Speed Machining of Al-alloy

Jong-Hak Yoon*, Moon-Seop Cheong**, Heon-Cheol Lee***

Abstract

High speed machining aims to raise the productivity and efficiency by making more precise and higher value-added products than any other machining method by means of the high speediness of spindle and feed drive system.

The purpose of this study is to investigate the effects of the run-out of endmill on the dimension precision of workpiece and to obtain the fundamental data on high speed machining, which is available by machining the side of Al-alloy with solid carbide endmills in high speed machining center and by measuring dimensions and surface roughness.

From the results of experimentations followings are obtained ; if spindle speed is ultrahigh in conditions that radial depth of cut and feed per tooth are very small, highly precise and accurate products are to be made efficiently with high feed rate, and so we can raise productivity.

Key Words : High speed machining(고속가공), Run-out(회전오차), Endmill(엔드밀), Surface roughness(표면 거칠기)

1. 서 론

빠르게 복잡 · 다양화하는 오늘날의 정보 · 산업화 사회에서는 수많은 요구가 생기고 이에 대응하여 많은 제품이 생산되며 따라서 산업 생산기술 특히 절삭가공 기술에도 큰 발전과 변화를 가져왔다.

상품주기의 단기화와 다종소량 생산에 따른 제품개발 · 제작기간의 단축, 제조비용 저감을 통한 가격경쟁력 제고, 고정도에 의한 품질향상 등의 필요성[1,2]에서 급속한 발전을 이룬 고속가공 기술은 가공시간을 단축시켜 놀라운 가공능률과 생산성 향상을 가져왔으며, 전기 · 전자, 자동차, 항공기, 광학기기 분야 등의 부품가공이나 금형 제작에 적용되며 급속히 실용화 단계에 접어들었다.

주축의 고속회전과 이송 구동계의 고속화로 상징되는 고속가공은 고속주축[3,4]의 개발로 가능했으며, 일반적으로 주축의 회전수가 10,000 rpm 이상이고 최고 100,000 rpm에 이르는 엔드밀 가공을 의미하는데[4,5] 보통 20,000-50,000 rpm의 고속주축을 탑재한 고속가공 기계

* 서울산업대학교 기계공학과
** 성동기계공업고등학교 교사
*** 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

가 널리 보급되어 있다[6-7].

또, 고속가공용 공구와 그 사용기술[6-8-10] 및 고속 프로그램 전송장치에 대한 지속적인 연구개발을 통해 고속가공의 기술적 과제들이 많이 해결되고 있다. 특히 고경도재나 난삭재를 비롯하여 난이도가 높고 복잡한 여러 형태의 공작물을 시간을 대폭 단축하여 고품질로 가공할 수 있으며[2-11-13] FF(flush fine) 가공기술이나 fP 개념(feed=Pick)의 기술이 실용화되고 있다. 즉, 고속가공은 절삭의 고속성뿐만 아니라 가공 시스템 전반의 고속성 측면에서 평가되어야 한다[14].

그런데 고속가공에서는 주축시스템의 고속화에 따라 불평형 질량에 의한 회전오차와 공구의 설치정도 및 단속절삭에 의해 가공정밀도가 큰 영향을 받는 것으로 생각되며[15], 또 회전오차의 측정을 통해 절삭동력과 표면 거칠기를 예측할 수 있다[16].

이 연구에서는 고속가공에서 생길 수 있는 여러 가지 오차[17] 중 공구의 흔들림 오차에 의한 공작물의 치수변화를 여러 가공조건을 통해 절삭 위치별로 알아보고 그에 따른 표면 거칠기의 상태를 실험적으로 살펴보았다. 그러나 절삭 중 공구와 공작기계의 거동을 측정하기는 쉽지 않으므로 이 거동이 공작물에 쉽게 옮겨지는 Al합금을 시험편으로 사용하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

2.1.1 실험장치

본 실험에서 이용한 머시닝센터는 화천기계공업(주)에서 제작한 SIRIUS-2로 주축의 회전수는 최고 12,000 rpm, 테이블속도는 1-24,000 mm/ min에 이른다.

이와 함께 3차원 측정기와 표면 거칠기 시험기의 사양을 Table 1에 나타냈다.

Table 1 Specifications of experimental equipments used

Instruments	Manufacturer & models	Specifications
CNC Vertical Machining Center	HWACHEON (Korea) SIRIUS-2	Feed range 560×410×60 mm Spindle rev. 100-12,000 rpm Table speed 1-24,000 mm/min Control system FANUC M18-C
3D-Coordinate Measuring Machine	DUKIN (Korea) MHB 1000C	Range 600×1,000×500 mm Resolution 0.0005 mm S/W Neuro measure v2.0
Surface Measuring Instrument	MITUTOYO (Japan) SURFTEST sv-500	Drive speed 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 m/s Range 8, 60, 600 μm S/W surfpak v3.00

2.1.2 절삭공구

본 실험에 사용한 공구는 초경 엔드밀로 Ø10, Ø8, Ø6의 것은 독일의 KENNAMETAL HERTEL이 제작한 것이고 Ø4의 것은 한국의 KOLOY가 제작한 것으로 Table 2에 이에 대한 사양을 나타냈다.

2.1.3 실험용 공작물 재료

실험에 사용된 재료는 알루미늄 합금 A6061s로 Table 3과 Table 4는 각각 이 재료의 화학적 성분과 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 2 Specifications of endmills used

Outside diameter (mm)	Length (mm)	Length of cut (mm)	Helix angle (°)	Number of flutes
10	72	22	60	3
8	63	19	60	3
6	57	13	60	3
4	45	12	30	4

Table 3 Chemical compositions of material (wt, %) (b=below)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
A6061s	0.40 -0.8	0.7 b	0.15 -0.40	0.15 b	0.8 -1.2	0.04 -0.35	0.25 b	0.15 b	0.15 b	the rest

Table 4 Mechanical properties of material

Material	Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Elongation (%)
A6061s	147 below	108	16 above

2.2 실험방법

2.2.1 실험용 공작물 제작

실험용 공작물은 범용 머시닝센터에서 가공하였는데 실험할 때 절삭조건마다 공작물을 설치·분리하면 오차요인이 증가하므로 Fig. 1과 같이 만들어 한번의 공작물 설치로 여러 가지 절삭조건을 실행할 수 있도록 하였다.

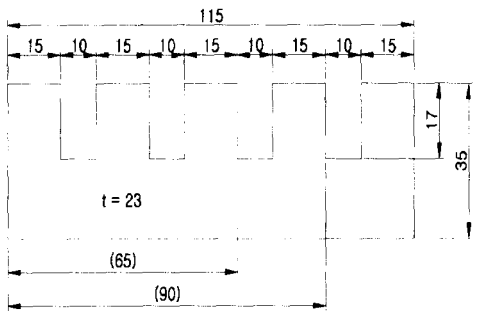

Fig. 1 Shape of Al-alloy workpieces

2.2.2 실험방법

실험은 Photo 1과 같이 테이블 위에 설치된 머신바이스에 미리 가공된 실험용 공작물을 고정하고 주축회전수, 이송속도, 절삭깊이 등에 변화를 주면서 습식으로 초경 엔드밀로 측면을 절삭하였다. 하향절삭이 가공된 면에 칩이 달라붙지 않으므로 절삭방향으로 선정하였다.

또한 절삭조건의 변화를 구현하기 위하여 시간적 간격을 두고 블록 절삭을 하였으며 Table 5에 그 절삭조건을 나타내었다.

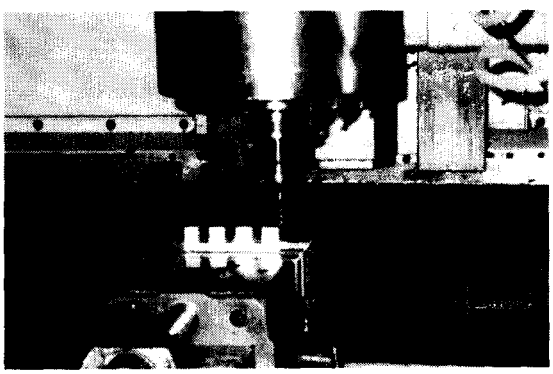

Photo 1 View between fixed workpiece and cutter

2.2.3 치수측정 방법

정밀한 치수변화를 알아보기 위하여 CNC 3차원 측정기를 사용하였으며 Fig. 2와 같이 표면에서 각각 1, 5, 9 mm 되는 곳의 측정점 p1, p2, p3에서 길이 l을 측정하였다.

2.2.4 표면 거칠기 측정 방법

표면 거칠기 측정 방법으로는 촉침식 표면 거칠기 시험기를 사용하였으며 수평대를 사용하여 공작물의 수평을

Table 5 Cutting conditions

Condition number	Spindle speed n(rev/min)	Feed per tooth f_z(mm/tooth)	Radial depth of cut t(mm)	Cutter dia. d(mm)	Axial depth of cut h(mm)	Measuring point from surface p(mm)
1	1,000	0.1	0.2	4, 6, 8, 10	10	1, 5, 9
2	2,000					
3	4,000					
4	8,000					
5	12,000					
6	10,000	0.05	0.2	4, 6, 8, 10	10	1, 5, 9
7		0.10				
8		0.15				
9		0.20				
10	10,000	0.1	0.1	4, 6, 8, 10	10	1, 5, 9
11			0.2			
12			0.3			
13			0.5			
14	10,000	0.1	0.2	4, 6, 8, 10	4	2
15					8	
16					12	

유지하였다. 또 기준길이를 2.5 mm로 하여 3회 연속 7.5 mm를 측정하고, 구동속도는 1 mm/s, 수직 측정범위는 80 ㎛로 하였으며 중심선 평균 거칠기(R_a) 값으로 나타내었다.

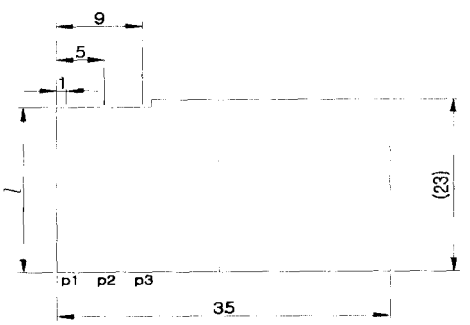

Fig. 2 Measuring points of workpieces

3. 실험결과 및 고찰

고속가공 기계에는 기계적 특성에 의해 치수가 영향받는 것을 줄이기 위한 기준치수 점검장치나 가공 중 공구의 반지름 방향 이동에 대해 자동적으로 균형을 수정해 주는 추종성 높은 공구 보정장치 등이 있기도 하지만[18], 공구의 중심 축을 공작기계의 주축 중심선에 일치시키기

는 매우 어려운 일이다[19]. 공구를 주축에 고정할 때 편심으로 인한 질량 불균형이 생기면 고속회전일수록 원심력에 의해 공구의 흔들림량은 더욱 커지고 표면으로부터의 위치에 따라 치수오차가 생길 수 있다고 예상할 수 있다.

3.1 주축속도의 변화

Fig. 3은 Ø10 초경 엔드밀로 공구날 1개당의 이송량을 0.1 mm/tooth로 일정하게 유지한 채, 반지름 방향 절삭깊이를 0.2 mm로 주면서 주축의 회전수를 최저 1,000 rpm부터 최고 12,000 rpm까지 변화시킬 때 측정위치에 따른 치수값을 나타낸 것이다(Table 5의 절삭조건 1-5).

한편 반지름 방향의 절삭깊이를 엔드밀 지름의 0.1배로 하여 초경 엔드밀로 Al합금을 측면 절삭할 때 공구날 1개당의 이송량은 절삭공구 제조업체의 추천값이 0.03(Ø4)-0.08(Ø10) mm/tooth이며[20], 실제의 여러 가공에서는 그 이하임을 참고로 하였다[2][13].

이 경우 공작물 표면에서 축방향 절삭깊이가 커질수록 치수가 작아지며 그 차이 e(=p1-p3 ; Fig. 3)는 대체로 5 ㎛정도이다. 이것은 주축의 회전속도에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있는데 이 현상은 공구의 모든 굵기에서 거의 동일한 양상으로 나타났다.

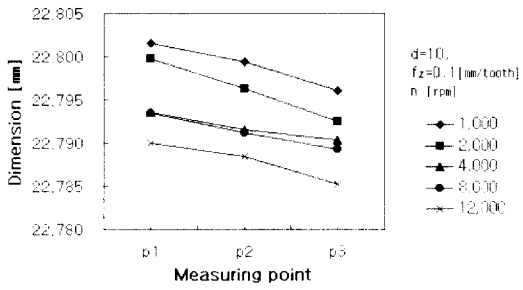

Fig. 3 Effects of spindle speed on dimension

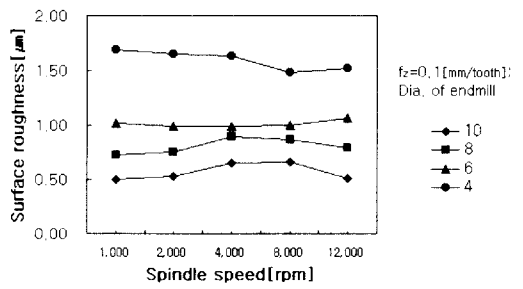

Fig. 4 Surface roughness with spindle speed

또 주축의 회전속도가 커질수록 공구의 모든 굵기에서 치수는 작아지고 있으며 1,000 rpm인 경우보다 12,000 rpm에서의 치수가 10-15 ㎛ 정도 작고 이것은 공구지름이 작아질수록 미소하나마 그 차이가 커짐을 알 수 있었다.

이는 주축 끝에서 돌출된 공구의 거리가 먼 지점일수록 모멘트가 커지고, 주축 회전수가 커질수록 원심력이 커지면서 휨 작용에 의한 편심의 증가로 주축의 흔들림이 커지기 때문이라고 생각되며, 미세하나마 공구의 지름이 작을수록 휨이 더 일어난다고 보여진다. 이 때 공구는 초경이므로 강성이 충분히 크고 재료는 알루미늄이어서 경도가 작아 절삭저항이 그다지 영향을 주지 않는 것으로 보여진다.

또 이 경우의 표면 거칠기는 공구날 1개당의 이송량이 일정하므로 주축의 회전수에 관계없이 거의 일정한 경향을 보이며 공구지름이 작아질수록 그 크기는 커지고 있다. 즉 Fig. 4에서와 같이 Ø10, Ø8, Ø6에서는 Ra가 1 ㎛ 이하, Ø4에서는 1.5-1.7 ㎛의 범위를 나타내고 있다.

3.2 공구날 1개당 이송량의 변화

Fig. 5는 Ø10 엔드밀로 주축의 회전수를 10,000 rpm으로 일정하게 유지한 채, 반지름 방향의 절삭깊이를 0.2 mm로 주면서 공구날 1개당의 이송량을 변화시킬 때 측정위치에 따른 치수를 나타낸 것이다(Table 5의 절삭조건 6-9).

이 경우에도 앞에서와 같이 공작물 표면에서 축 방향의 절삭깊이가 멀어질수록 치수가 작아지는 현상이 공구의 모든 굵기에서 나타났으며 그 차이 e(=p1-p3 ; Fig. 5)는 3-7 ㎛ 정도이다

Fig. 5에서 공구날 1개당의 이송량이 작을수록 치수가 작아짐을 알 수 있는데 공구의 모든 굵기에서 나타났다. 이는 주축의 회전속도가 일정하고 공구날 1개당의 이송량이 작아질수록 가공시간이 많아지며, 따라서 공구와 공작물 사이의 접촉시간이 길어지면서 공구의 흔들림만큼 반복 가공되는 점이 휨 현상과 상승작용을 하기 때문이라고 보여진다.

또 f_z=0.20 mm/tooth인 경우와 f_z=0.05 mm/ tooth인 경우의 치수 차를 비교해보면 Ø4에서 약 7 ㎛, Ø10에서 약 16 ㎛를 보이며 공구지름이 커질수록 치수 차가 커짐을 즉, 그래프의 기울기가 급해짐을 알 수 있었다. 이는 공구지름이 클수록 절삭속도가 커져 접촉길이가 길어지므

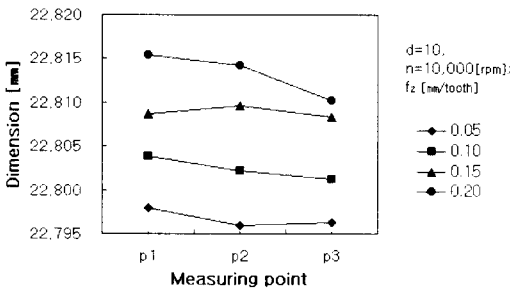

Fig. 5 Effects of feed per tooth on dimension

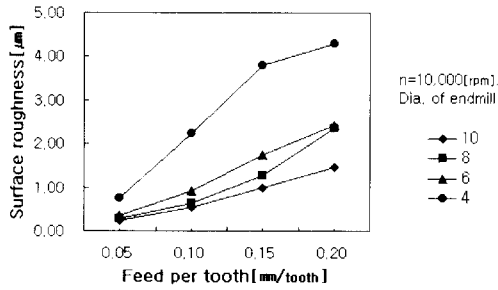

Fig. 6 Surface roughness with feed per tooth

로 더 가공되기 때문이라고 생각된다. 또한 작은 지름의 공구가 더 휘어지기 쉽기 때문에 공구 지름이 작아질수록 치수가 작아짐을 알 수 있었다.

Fig. 6에서 보듯이 표면 거칠기는 공구의 모든 굵기에서 공구날 1개당의 이송량이 작아질수록 R_a가 뚜렷하게 작아진다. 즉 f_z=0.20 mm/ tooth인 경우의 R_a는 Φ10에서 1.47 ㎛, Φ8에서 2.35 ㎛, Φ6에서 2.43 ㎛, Φ4에서 4.28 ㎛를 보이지만 f_z=0.05 mm/tooth인 경우는 Φ10, Φ8, Φ6에서 0.23-0.35 ㎛, Φ4에서는 0.75 ㎛의 높은 다듬질 정도를 나타내어 고속가공의 우수한 점을 보여주고 있다.

3.3 반지름 방향의 절삭깊이의 변화

Fig. 7(a)는 Φ10 엔드밀로 주축의 회전수를 10,000 rpm으로 일정하게 유지한 채, 공구날 1개당의 이송량을 0.1 mm/tooth로 주면서 반지름 방향의 절삭깊이를 변화시킬 경우의 측정위치에 따른 치수를 나타낸 것이고, Fig. 7(b)는 Φ4 엔드밀로 절삭하는 경우이다(Table 5의 절삭조건 10- 13).

공작물 표면에서 멀어질수록 치수가 작아지는 것은 앞의 절삭조건들과 같은 경향이나, 반지름 방향의 절삭깊이가 커지면 공구지름이 작아짐에 따라 그 차이가 5 ㎛이내에서 조금씩 줄어들었고, Φ4에서는 오히려 p1보다 p3의 치수가 커지는 경향을 보였다. 이는 반지름 방향의 절삭깊이가 커짐에 따라 절삭저항이 증가하면서 공구지름이 작은 경우의 공구강성을 이겨내기 때문이라고 보여진다.

또 반지름 방향의 절삭깊이가 커질수록 지령한 치수를 완전히 가공하지 못하는 현상이 공구의 모든 굵기에서 나타나는데 Fig. 7(b)의 Φ4인 경우에서 보듯이 공구지름이 작아질수록 뚜렷하다. 이러한 것들은 공작물 재료가 Al합금이지만 반지름 방향의 절삭깊이가 커지면서 절삭저항이 커져 주축의 흔들림에 의한 치수오차를 일부 상쇄한 것이라고 생각되며, 단단한 재료일수록 이 현상이 더욱 두드러지리라 예측할 수 있다.

이 경우의 표면 거칠기는 절삭깊이가 커지면서 미소한 증가를 가져오나 이는 무시할 수 있을 정도이며 결국 공구날 1개당의 이송량이 일정하므로 Ra가 일정하다고 간주해도 좋다. Fig. 8이 이를 보여 주고 있다.

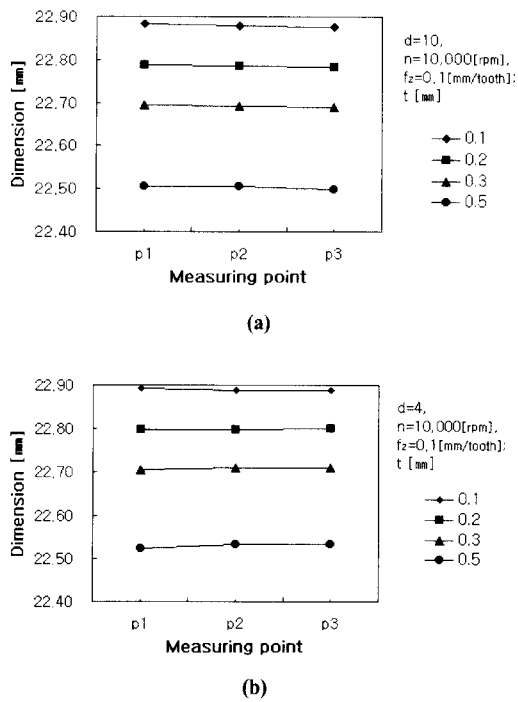

Fig. 7 Effects of radial depth of cut on dimension

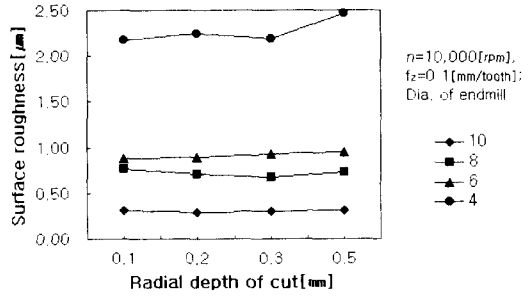

Fig. 8 Surface roughness with radial depth of cut

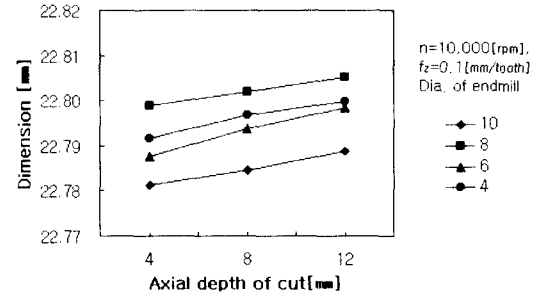

Fig. 9 Effects of axial depth of cut on dimension

앞의 여러 절삭조건에서 공구날 1개당의 이송량이 0.1mm/tooth 이내이고 공구지름이 Φ10, Φ8, Φ6인 경우의 Ra는 모두 1 ㎛ 이내이며 Φ4인 경우만 Ra가 뚜렷하게 커짐을 알 수 있다. 즉, 공구의 지름과 공구날 1개당의 이송량이 표면 거칠기에 가장 큰 영향을 주는 인자임을 알 수 있다. 따라서 공구지름이 작아질수록 주축의 회전수가 수 만 rpm에 이르는 고속가공을 해야 정도 높은 다듬질 면을 얻을 수 있음을 추측할 수 있다.

3.4 축 방향의 절삭깊이의 변화

Fig. 9는 주축의 회전수를 10,000 rpm, 공구날 1개당의 이송량을 0.1 mm/tooth, 반지름 방향의 절삭깊이를 0.2 mm로 일정하게 유지한 채, 공구의 축 방향 절삭깊이 즉, 가공깊이만을 다르게 했을 때의 여러 공구 굵기에 대한 치수를 나타낸 것이다. 즉, 가공깊이를 4, 8, 12mm로 하여 가공하고 표면에서 2mm 되는 곳의 치수를 비교하였다 (Table 5의 절삭조건 14-16).

가공깊이가 클수록 치수가 커짐을 알 수 있는데 이는 가공깊이가 클수록 공작물과 공구와의 접촉면적이 커져 절삭저항이 커지고 따라서 모멘트와 편심에 의한 공구의 흔들림을 밖으로 밀어내면서 가공하기 때문이라고 보여진다.

그러므로 고속가공에서는 공구의 가공깊이를 작게 하고 그에 맞추어 공구의 돌출길이도 작게 하여 가공하는 것이 치수 정밀도에 좋은 결과를 가져오며, 목표로 하는 가공 정밀도와 가공시간 등을 고려하여 알맞은 가공깊이를 선택해야 한다고 본다.

이 경우 가공깊이에 따른 표면 거칠기의 변화는 거의 없었다.

4. 결 론

고속가공에서의 공구의 흔들림이 공작물 치수와 표면 거칠기에 어떤 영향을 주는가를 알아보기 위한 이 연구에서 초경 엔드밀로 Al합금을 측면 절삭한 후 3차원 측정기로 치수를 재고 표면 거칠기 시험기로 표면 거칠기를 측정하였다.

사용한 초경 엔드밀은 Φ10, Φ8, Φ6, Φ4이고 주축의 회전수, 공구날 1개당의 이송량, 반지름 방향의 절삭깊이 및 축 방향의 절삭깊이 등을 변화시키며 여러 절삭조건으로 가공한 후 치수와 표면 거칠기를 측정해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고속가공에서는 공구의 설치정도 및 편심으로 인한 공구의 흔들림이 공작물 치수에 영향을 주는 중요한 인자이다.

(2) 공작물 표면에서 먼 곳일수록 치수가 작아지며, 공구날 1개당의 이송량이 일정해도 주축의 회전수가 커질수록 공구의 굵기에 관계없이 치수가 작아진다.

(3) 공구날 1개당의 이송량이 작을수록 치수가 작아지며, 반지름 방향의 절삭깊이가 커질수록 지령한 치수가 완전히 가공되지 않는다.

(4) 공구날 1개당의 이송량을 0.05 mm/tooth 내외로 작게 하고 주축을 10,000 rpm 이상으로 고속화시키면 그에 따른 고속이송이 실현되고 고정도 · 고품위의 다듬질 면을 얻을 수 있다.

고속가공은 적은 수의 공구를 쓰는 절삭공정만으로 단시간에 고품위의 제품을 만들 수 있는 고능률 가공이므로 더 많은 연구가 이뤄져야겠다.

후 기

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) 池田直弘, "曲面の高速切削加工", 機械技術, 第42券, 第7 , pp. 18~20, 1994.
(2) 嶽岡悅雄, "切削加工の最新技術動向 : 高速切削加工法", 機械技術, 第45券, 第10 , pp22-26, 1997
(3) S.Nakamura, "High-Speed Spindles for Machine Tools", Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 30, No. 4, pp. 291~294, 1996.
(4) 嶽岡悅雄, 齋藤博, 相田收平, 宮口弘明, 石川淳, 岩部洋育, "高硬度材の高速エンドミルに關する研究(第1報)", 精密工學會誌, 第62券, 第1, pp. 115~119, 1996.
(5) R.C. Dewes, D.K. Aspinwall and M.L.H. Wise, "High Speed Machining Cutting Tools and Machine Requirements", Proceedings of the 31st Int. MATADOR Conf., Manchester, UK, pp. 455~461, 1995.
(6) 松岡甫篁, "實用段階をむかえた高速切削技術", 機械と工具, 第40券, 第5 , pp. 10~15, 1996.
(7) 武野仲勝, "世界の超高速加工機の趨勢", 機械と工具, 第41券, 第7 , pp. 107~114, 1997.
(8) 河村文俊, "高能率 · 高品位加工に對應する切削工具 : エンドミル", 機械技術, 第44券, 第6 , pp. 24~27, 1996.
(9) M. Anzai, I. Takahashi and T. Matsuoka, "Ultra High Speed Milling and Cutting Tools", Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 30, No. 4, pp. 299~303, 1996.
(10) 松岡甫篁, "超高速CNC切削技術のすべて", 機械と工具, 第41券, 第6, pp. 96~97, 1997.
(11) Richard C. Dewes and David K. Aspinwall, "A Review of Ultra High Speed Machining of hardened Steels", Journal of Materials Processing Technology, 1996.
(12) 池田直弘, "溝 · 壁 · 平面などの高速切削", 機械技術, 第42券, 第7, pp. 21~23, 1994.
(13) Jurgen R ders, Soltau, "강을 고속밀링한다", 프레스&형기술, 6월호, pp. 80~83, 1998.
(14) 龍江義孝, "다듬질 정밀도 향상을 위한 NC 고속가공", 月刊型技術, 9월 , pp. 2~6, 1990.
(15) 김경균, 이용철, 이득우, 김정석, 황경현, "범용 머시닝센터에서 주축증속기를 이용한 고속절삭에 관한 연구", 韓國精密工學會 '96年度 秋季學術大會論文集, pp. 41~45, 1996.
(16) 김병국, 이기용, 이득우, 김정석, "고속 볼엔드밀가공에서 회전오차의 측정을 통한 표면거칠기 예측에 관한 연구", 韓國精密工學會 '97年度 春季學術大會論文集, pp. 889~893, 1997.
(17) 岩部洋育, 竹本和博, 今井純一, "エンドミルによる高速加工に關する研究", 日本機械學會論文集(C編), 第63券, 第612 , pp. 302~309, 1997.
(18) 武野仲勝, "高品質切削加工における寸法精度と仕上げ面粗さ", 機械と工具, 第39券, 第11, pp. 116~121, 1995.
(19) 岩部洋育, 三星宏, "ねじれ刃エンドミルの偏心が加工精度に及ぼす影響", 精密工學會誌, 第61券, 第6 , pp. 834~838, 1995.
(20) 주식회사 양지원공구, 종합Catalog, p. 272, 1995.