

Al합금의 고속 원통가공에서 발생하는 치수오차와 진원도의 영향 고찰

윤종학*, 서성원*, 이현철**

A Study on the Effect of Dimensional Errors and Roundness in High Speed Cylindrical Machining of Al-alloy

Jong-Hak Yoon*, Seong-Won Seo*, Heon-Cheol Lee**

Abstract

Recently, the requirements for high precision and efficiency machining are gradually increased to raise international competitiveness at the industrial fields of die and molds. This trend had made effects on the industrial fields in Korea and which needs for studying of high precision and efficiency machining.

This study is to investigate the effects of the run-out of end mill in the external cylindrical machining operated by solid carbide end mills with Al-alloy in high speed machining center relating to high spindle revolution and fast feed per minute on the dimensional precision, roundness of workpiece.

From the results of experimentations followings are obtained; when Al-alloy is processed by the external cylindrical cutting of end milling through the high speed revolution, if the spindle revolution is higher relating to radial depth of cut, feed per tooth in very lower situation, finally, productivity can be raised because high precision and quality products are machined high efficiently.

Key Words : External Cylindrical Cutting(원통가공), Run-out(회전오차), Roundness(진원도), Solid Carbide End Mill(초경 엔드 밀)

1. 서 론

주요기계의 동력전달계통에는 원형단면의 부품들이 많으며, 절삭운동에 있어서도 회전운동이 대표적이라 할 수 있는데, 이러한 회전운동에 의한 절삭가공에서 발생하는

오차는 회전체의 진원도에 기인하게 된다. 이러한 원형 부품의 형상이 진원으로부터 벗어났을 경우 접촉운동부위에서는 마찰이 발생하여 동력손실은 물론 마모에 의한 기계 수명의 단축, 회전이나 길이방향 이동의 부정확, 진동 및 소음 등과 같은 많은 문제들을 유발시키게 된다.^(1,2)

* 서울산업대학교 기계공학과(윤종학: jhyoon@duck.snut.ac.kr)
** 서울공업고등학교 교사

따라서 원형 부품으로 구성된 공작기계는 그 원형 부품에 대한 치수정밀도 뿐만 아니라 진원도를 크게 향상시킬 필요성이 요구되는 데 일반적으로 원형 부품의 정밀가공은 선반이나 원통 연삭, 보링 등의 가공에서 주로 작업하고 있지만, 공작물에 따라서는 머시닝센터에서 오히려 쉽게 가공할 수 있으므로 머시닝센터에 의한 내·외경가공의 진원도는 매우 중요한 인자라고 할 수 있다.⁽³⁾

국내의 고속가공에 대한 연구는 초보단계에 지나지 않아 이에 대한 관련 자료나 경험이 부족한 상태이며 현재 고속가공기를 도입한 일부 대학과 연구소를 중심으로 기초적인 연구가 진행되고 있는 실정이고,⁽⁴⁾ 특히 고속가공에서는 주축 시스템의 고속화로 불평형 질량(Unbalanced mass)에 의한 회전오차가 생기고 공구 설치 정도의 부정확과 단속절삭(斷續切削)이 가공 정밀도에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으므로,⁽⁵⁾ 향후 우리 산업계에서도 보다 체계적이고 지속적으로 이 분야에 대한 관심과 연구가 절실히 요구된다고 할 수 있다.

본 논문에서는 머시닝센터에서 Al 합금을 고속 엔드밀링으로 원통가공을 하였을 때 생길 수 있는 여러 가지 오차의 요인 중 주축의 고속 회전에 따른 공구의 흔들림이 공작물의 치수 변화와 진원도에 어떠한 영향을 주는지를 여러 가지 절삭 조건에 따라 실험적으로 살펴봄으로서 고속 원통가공을 수행하기 위한 최적의 절삭 조건과 이에 따른 기초 자료를 제시하는데 본 논문에서의 연구 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 절삭공구

2.1.1 실험장치

본 실험에서 사용한 고속 머시닝센터는 (주)현대정공에서 제작한 AJV-18로 주축의 최고 회전수는 10,000 rpm, 이송속도는 30,000 mm/min에 이른다.

이와 함께 실험에 사용된 시험편은 CNC 선반에서 제작하였고, 실험 후 시험편의 치수변화와 진원도를 알아보기 위하여 각각 3차원 측정기와 진원도 측정기를 사용하였다.

2.1.2 절삭공구와 시험편 재료

본 실험에 사용한 절삭공구는 (주)양지원 공구에서 제조한 Al합금 고속가공용 초경 엔드 밀로, 특히 Helix angle을 45°로 하여서 칩 배출이 용이하도록 하였다.

Table 1에 이에 대한 사양을 나타냈다.

또한 실험에 사용한 시험편의 재료는 절삭 중 공구와 공작기계의 거동이 공작물에 쉽게 전이될 수 있는 알루미늄 합금을 사용하였고, Table 2와 Table 3은 각각 이 재료의 기계적 성질과 화학적 성분을 나타낸 것이다.

Table 1 Specifications of end mills

Outside diameter (mm)	Length L(mm)	Length of cut l(mm)	Helix angle (°)	Number of blades
4	57	11	45	2
6	57	13	45	2
8	63	19	45	2
10	72	22	45	2

Table 2 Mechanical properties of material

Material	Material properties		
	Tensile strength (kg/mm ²)	Yield strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
A2024S	>49	>37	>10

Table 3 Chemical compositions of material

Material	Compositions (wt, %)								
	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Others	Al
A2024S	3.8-4.9	<0.5	<0.5	0.3-0.9	1.2-1.8	<0.25	<0.1	<0.15	the rest

2.2 실험방법

2.2.1 시험편 제작과 실험방법

실험에 사용한 공작물은 Fig. 1과 같이 머시닝센터에서 연동 척에 고정하여 원통가공 실험을 할 수 있도록 CNC 선반에서 균일하게 황삭·정삭으로 단차가공하여 제작하였다.

시험편의 고정에는 보다 쉽고 정확하게 고정할 수 있는 연동 척을 사용하였으며, 시험편의 직각도는 다이얼 게이지로 ±0.01mm 이내에 들도록 고정하여 실험하였다.

절삭 조건 선정은 공구 제조사의 추천 값과 다른 실험 자료에서 얻은 값을 기초로 예비 실험을 수행하여 사용 기계에 무리한 진동이 발생하지 않고 원활한 가공이 가능한 범위로 Table 4와 같이 선택하였으며 엔드 밀의 돌출 길이도 변화를 주면서 습식으로 원통가공을 하였다.

또한 엔드 밀의 돌출길이(Table 4의 H_i)는 밀링 척 하단에서 엔드 밀 끝까지의 높이로 엔드 밀의 직경에 따른 절삭 날 길이의 차이를 고려하여 날 길이보다 $10 \pm 0.05\text{mm}$ 더 길게 고정하여 실험하였다.

Fig. 2는 절삭가공에서 엔드 밀의 가공 경로를 나타낸 것이다.

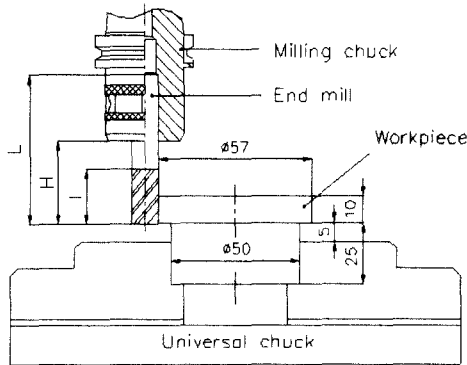


Fig. 1 Shape of workpiece and fixture

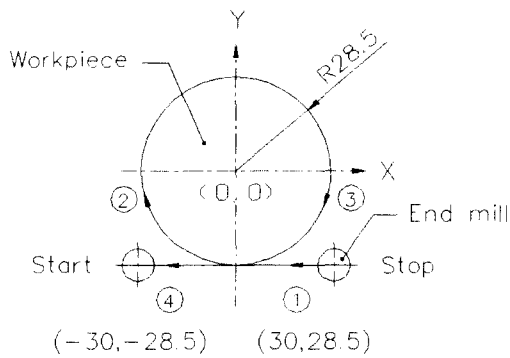


Fig. 2 Trace of end mill

2.2.2 치수와 진원도 측정 방법

시험편의 지름은 3차원 측정기로 변화량을 확인하였으며, 측정부위는 시험편의 윗면으로부터 5 mm 떨어진 가

Table 4 Cutting conditions

Condition number	Spindle revolution n(rpm)	Feed per tooth fz(mm/tooth)	Radial depth of cut t(mm)	End mill dia. d(mm)	Extruded length Hi(mm)
1	2,000	0.05	0.3	4, 6, 8, 10	21, 23, 29, 32
2	4,000				
3	6,000				
4	8,000				
5	10,000				
6	9,000	0.025	0.3	4, 6, 8, 10	21, 23, 29, 32
7		0.05			
8		0.1			
9		0.15			
10		0.2			
11	9,000	0.05	0.1	4, 6, 8, 10	21, 23, 29, 32
12			0.3		
13			0.5		
14			0.7		
15			0.9		
16	9,000	0.05	0.3	4, 6, 8, 10	21, 23, 29, 32
17					26, 28, 34, 37
18					31, 33, 39, 42

공 면의 중간지점 지름을 측정하였다.

진원도의 측정은 테이블 회전식 측정기를 사용하였으며, 측정부위는 치수 측정과 마찬가지로 시험편의 윗면으로부터 5 mm 떨어진 가공 면의 중간지점을 택하였고 진원도 평가는 반경법의 최소 영역법(MZC)으로 처리하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 주축 회전수의 변화에 따른 치수 변화와 진원도 영향

주축 회전수의 변화가 시험편의 지름과 진원도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 먼저 Table 4의 조건 1-5로 절삭하였다.

Fig. 3은 $\phi 4-\phi 10$ mm 초경 엔드 밀로 이송량을 0.05 mm/tooth, 반지름 방향의 절삭깊이를 0.3 mm로 일정하게 하고, 주축의 회전수를 최저 2,000 rpm부터 최고 10,000 rpm까지 2,000 rpm씩 증속하며 상향절삭을 하

있을 때 시험편의 지름 변화를 나타낸 것으로, 회전수가 커질수록 공구의 모든 직경에서 가공된 시험편의 지름은 점점 작아지고 있다. 이러한 현상은 예상했던 대로 주축의 회전수가 커질수록 공구의 흔들림도 커지게 되는데, 이것은 공구에 작용하는 모멘트 및 원심력의 증가에 의한 힘으로 공구는 중심선을 벗어나 바깥쪽으로 작으나마 휘어지게 되고, 상대적으로 회전반경은 증가하여 반지름 방향의 절삭량이 커지게 되는 것으로 보여진다.

실제로 2,000 rpm과 10,000 rpm에 대한 측정값을 비교해 보면 공구의 직경에 따라 7.0 μm 에서 13.6 μm 정도의 차이가 나고 있으며, 이러한 오차는 공구의 직경이 작

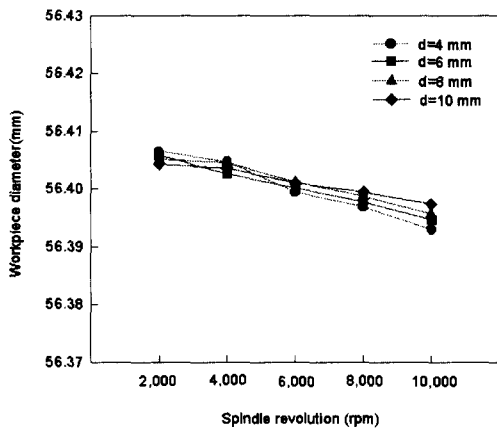


Fig. 3 Effects of spindle revolution on diameter

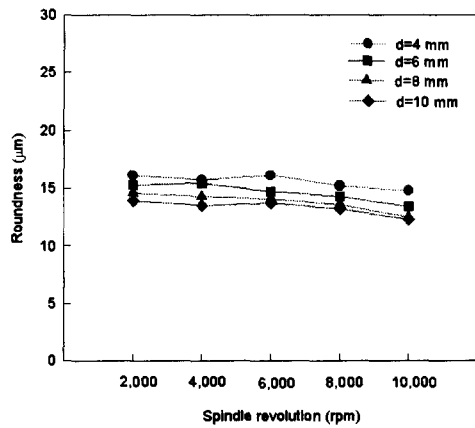


Fig. 4 Roundness w.r.t. spindle revolution

을수록 더 커지고 있는 것으로 볼 때 공구의 직경이 작을수록 주축의 고속 회전에 의한 힘의 영향을 더 받을 것으로 보여진다.

Fig. 4는 주축 회전수에 따른 진원도의 변화를 나타낸 것으로 주축 회전수가 직접적으로 진원도에 큰 영향을 준 것으로 보이지는 않으나 공구의 지름이 클수록 진원도가 좋았고 그 크기는 대략 12 μm 에서 16 μm 정도였다.

이러한 경향은 동일한 회전수에서 볼 때 지름이 작은 공구보다는 큰 공구의 절삭속도가 상대적으로 빨라져서 절삭저항이 감소하여 공구와 공작물 사이의 진동 감소 등의 영향으로 진원도가 좋게 나타난 것으로 보인다.(6) 또한 사용하는 기계의 주축 회전수가 10,000 rpm 이내이므로 이 회전수에서의 진원도가 매우 나빠질 것으로 예상했으나 실제로 실험한 결과에서는 작으나마 더 좋은 진원도를 나타내었다.

3.2 이송속도에 따른 치수 변화와 진원도 영향

공구 날 1개당의 이송량이 가공 면의 지름과 진원도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 4의 조건 6-10으로 절삭하였다.

Fig. 5는 $\varnothing 4\text{-}\varnothing 10\text{ mm}$ 초경 앤드 밀로 회전수 9,000 rpm에 반지름 방향의 절삭깊이를 0.3 mm로 일정하게 하고, 날 1개당의 이송량을 0.025 mm/tooth부터 0.2 mm/tooth까지 변화시키면서 절삭하였을 때, 시험편의 지름 변화를 나타낸 것이다.

도시된 바와 같이 날 1개당의 이송량이 커질수록 모든 공구의 직경에서 가공된 시험편의 지름은 감소하였는데, 일반적으로 직선가공에서는 공구에 작용하는 모멘트와 원심력에 의한 휨 현상 이외에 주축의 회전수가 일정하고 이송량이 작아질수록 테이블의 이송속도가 느려지면서 가공시간이 늘어나며, 공구와 공작물 사이의 접촉시간이 길어지면서 공구의 흔들림만큼 반복 가공되는 위치가 중복되어 치수가 작아지는 경향을 나타내는 데(8), 본 실험에서는 오히려 이송량이 커질수록 치수가 작아지는 정반대 현상이 나타났고, 다른 연구 결과에서도 비슷한 경향을 확인할 수 있다.(9)

이러한 현상은 날 1개당의 이송량이 커질수록 지름이 더욱 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있는데, 예를 들면 $\varnothing 10\text{ mm}$ 공구에서 0.025 mm/tooth인 경우와 0.20 mm/tooth인 경우의 지름 치수에 대한 치수 오차는 전자의 경우 대략 1.3 μm 인 반면에 후자의 경우는 -121.7 μm 으로 치수 오차가 매우 커졌음을 알 수 있다.

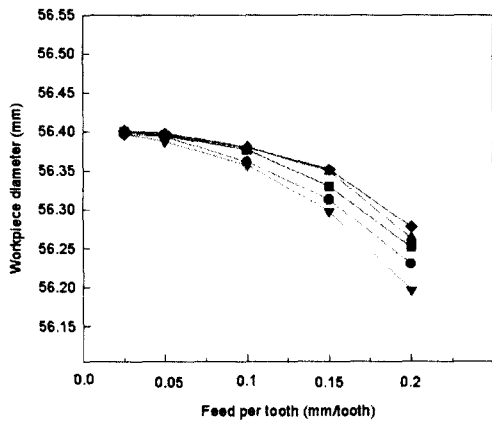


Fig. 5 Effects of feed per tooth on diameter

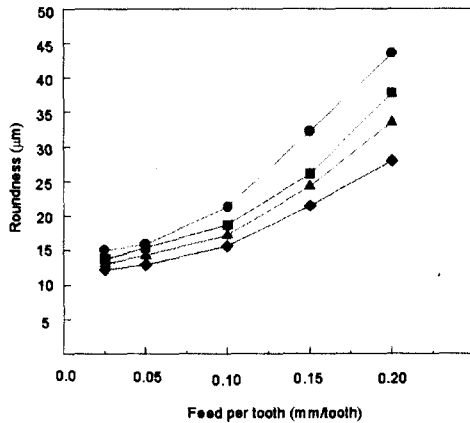


Fig. 6 Roundness w.r.t. feed per tooth

이러한 현상을 보다 명확히 관찰하고자 같은 조건에서 3날 초경 엔드 밀로 절삭한 후 지름을 측정된 결과 Fig. 5의 역삼각형 형태로 더욱 급격하게 직경이 감소하였다. 이 실험에서도 날 1개당의 이송량 0.025 mm/tooth와 0.20 mm/tooth인 경우 지령 치수에 대한 치수 오차가 전자에서는 -2.8 μm이며 후자는 -203.6 μm으로 빠른 이송에서 치수정도가 더 나쁘다는 것을 알 수 있었다.

이러한 현상은 NC 기계의 서보 제어 방식에서 발생된 내부 회전 오차의 영향으로 생각되며, 특히 이러한 오차는 이송 속도가 빠를수록 커지게 되는 데, 이때 기계가 지연되어 정지하거나 직선 경로를 이동할 때에는 이러한 오차의 영향이 거의 없지만 곡선 경로에서는 최단거리로 따라

가려는 경향 때문에 안쪽으로 파고들면서 이동하여 빠른 이송일수록 시험편의 지름이 더 줄어든 것⁽¹⁰⁻¹¹⁾이라고 생각된다.

Fig. 6은 날 1개당의 이송량에 대한 진원도의 변화를 나타낸 것이다. 도시된 바와 같이 날 1개당의 이송량이 커질수록 모든 공구의 직경에서 진원도는 급격하게 나빠지는 경향을 나타내고 있다. 즉, 이송량 0.05 mm/tooth 이하에서는 진원도가 대략 12 μm에서 16 μm 정도로 대체로 양호한 반면 그 이상에서는 현저히 나빠지는 경향을 보이고 있는데 특히, 공구의 직경이 작을수록 이송량의 증가에 따른 진원도의 변화는 급격해지고 있다.

예를 들면 φ10과 φ4 엔드 밀의 경우 이송량 0.025 mm/tooth와 2.0 mm/tooth에서 진원도의 차이는 φ10이 15.7 μm이었고 φ4는 28.4 μm으로 12.7 μm이나 더 나빠졌음을 알 수 있다.

이는 빠른 이송일수록 공작기계의 구조상 이상적인 원호이송이 보장되기 어렵고, 또한 절삭공구와 공작물과의 상호 마찰이 커져서 절삭저항과 떨림이 급격히 증가되어 공구의 이상적인 원호이송을 방해하기 때문에 표면정도가 나빠지고 진원도도 급격히 떨어지는 것으로 여겨진다.^(6,8)

3.3 반지름 방향의 절삭깊이에 따른 치수 변화와 진원도 영향

반지름 방향의 절삭깊이가 가공 면의 지름과 진원도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 4의 조건 11-15로 절삭하였다.

Fig. 7은 φ4-φ10 mm의 초경 엔드 밀로 회전수를 9,000 rpm, 날 1개당의 이송량을 0.05 mm/tooth로 하고, 반지름 방향의 절삭깊이를 0.1 mm부터 0.9 mm까지 0.2 mm씩 증가시켰을 때 시험편의 치수 정밀도를 나타낸 것이다.

도시된 바와 같이 반지름 방향의 절삭깊이가 커질수록 모든 공구의 직경에서 지령 치수에 대한 치수 오차가 점점 증가하였는데, 특히 절삭깊이 0.5 mm 이하에서는 모든 공구의 직경에서 치수 오차가 -5.0 μm에서 -0.1 μm으로 지령 치수보다 약간 작은 값을 나타냈다.

그러나 절삭깊이 0.7 mm 이상에서는 대략 5.0 μm에서 9.0 μm 정도로 양(+)의 치수 오차를 나타냈으나 이러한 오차는 매우 작은 값이라고 생각된다.

이러한 현상은 비록 시험편의 재료가 Al합금이고 사용 공구가 초경이지만 반지름 방향의 절삭깊이가 커질수록

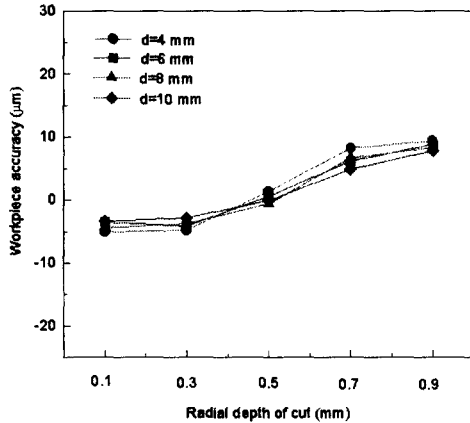


Fig. 7 Effects of radial depth of cut on workpiece accuracy

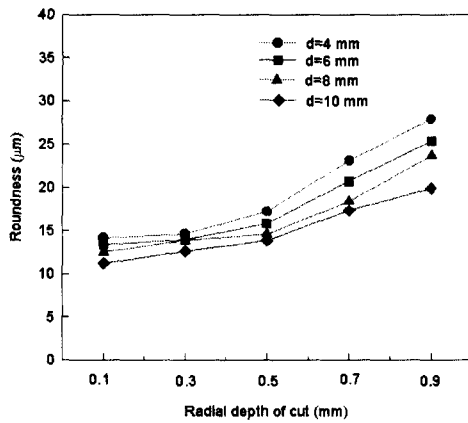


Fig. 8 Roundness w.r.t. radial depth of cut

절삭저항도 커져서 공구의 흔들림에 의한 치수 오차가 일부 상쇄되어 미세하나마 지령 치수보다 덜 가공된 것⁶⁾으로 생각된다.

Fig. 8은 반지름 방향의 절삭깊이에 따른 진원도의 변화를 나타낸 것이다. 도시된 바와 같이 대략 0.5 mm 이하의 절삭깊이에서는 칩에 고정된 공작물과 공구와의 떨림 현상이나 절삭저항이 그다지 크지 않아서 전체적으로 모든 공구의 직경에서 진원도가 대략 11 µm에서 17 µm 정도로 비교적 양호한 상태를 보였다.

그러나 절삭깊이가 0.7 mm 이상으로 과다할 때에는 진원도가 대략 18 µm에서 28 µm으로 나빠지는 것을 알 수 있다. 이는 절삭량이 과다하면 공작물과 공구사이에 진동

이 발생하고, 절삭저항이 커져서 공구의 이상적인 원호이송을 방해하므로 진원도가 나빠지는 것으로 보인다.⁶⁾ 그리고 엔드 밀의 상향절삭에서는 절삭깊이가 증가하면 절삭력이 작용하는 방향 때문에 커터가 공작물을 들어올리는 것과 같이 되어 진동이 쉽게 발생¹²⁾하기 때문에 진원도가 나빠지는 것으로 보인다.

3.4 엔드 밀의 돌출길이에 따른 치수 변화와 진원도 영향

엔드 밀의 돌출길이가 가공 면의 지름과 진원도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 4의 조건 16-18로 절삭하였다.

Fig. 9는 $\varnothing 4\text{-}\varnothing 10$ mm의 초경 엔드 밀로 회전수를 9,000 rpm, 공구 날 1개당의 이송량을 0.05 mm/tooth, 반지름 방향의 절삭깊이를 0.3 mm로 일정하게 하고, 엔드 밀의 돌출길이 H1, H2, H3을 공구의 직경에 따른 절삭날 길이보다 10, 15, 20 mm 정도 길게 고정하여 절삭하였을 때 시험편의 지름 변화를 나타낸 것이다.

도시된 바와 같이 모든 공구의 직경에서 돌출길이가 길어짐에 따라 시험편의 지름이 약간 감소하는 경향을 나타냈고, 그 크기는 0.9 µm에서 2.4 µm 정도로 매우 작았다.

그러나 본 실험에서는 엔드 밀의 돌출길이가 지나치게 길면 주축의 고속회전에 의한 원심력의 영향을 더 크게 받아서 공구의 휨에 의한 치수 오차가 더 커질 것으로 예측되므로 적정길이 유지에도 세심한 주의가 요구된다.

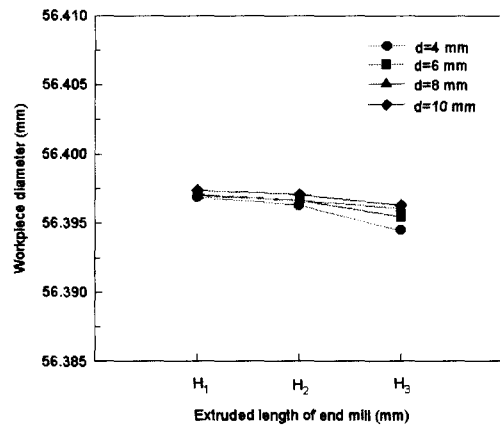


Fig. 9 Effects of extruded length of end mills on diameter

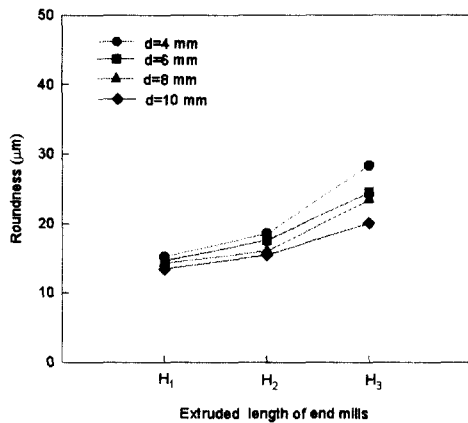


Fig. 10 Roundness w.r.t. extruded length of end mills

Fig. 10은 엔드 밀의 돌출길이에 따른 진원도의 변화를 나타낸 것이다. 도시된 바와 같이 모든 직경의 공구에서 돌출길이가 커질수록 진원도가 나빠짐을 확인할 수 있었다.

특히 이러한 현상은 엔드 밀의 직경이 작을수록 더 현저하게 나타났는데, 예를 들면 $\phi 4$ mm 공구와 $\phi 10$ mm 공구에서 엔드 밀의 돌출길이 H₁과 H₃에 대한 진원도를 비교해 보면 $\phi 4$ mm 공구에서는 15.2 μ m과 28.3 μ m으로 그 차이가 13.1 μ m이고, $\phi 10$ mm 공구에서는 13.4 μ m과 20.1 μ m으로 그 차이가 6.7 μ m이었다. 따라서 엔드 밀의 돌출길이에 따른 진원도의 변화는 직경이 작은 공구일수록 더 심하다는 것을 알 수 있다.

따라서, 머시닝 센터에서 AI합금을 고속 엔드밀링으로 원통가공을 할 때에는 치수 정밀도의 향상과 보다 양호한 진원도를 얻으려면 엔드 밀의 적정 돌출 길이 유지에 세심한 주의가 요구된다고 생각된다.

4. 결론

본 논문은 고속 머시닝센터에서 2날 초경 엔드 밀을 사용하여 실험한 것이다. 절삭조건으로 주축의 회전수, 공구의 날 1개당 이송량, 반지름 방향의 절삭깊이, 엔드 밀의 돌출 길이 등을 변화시켜 상향 절삭으로 원통가공을 한 후, 가공 면의 지름과 진원도를 측정하여 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주축의 고속화에 따른 공구의 회전 오차는 날 1개당

이송량이 일정해도 주축의 회전수가 커질수록 공구의 직경에 관계없이 가공 면의 지름이 작아지며, 특히 공구의 직경이 작을수록 이러한 경향은 현저하였다.

- (2) 주축의 고속화가 진원도에 큰 영향을 주지는 않으나 동일한 회전수에서는 공구의 직경이 클수록 진원도가 좋았다.
- (3) 날 1개당의 이송량이 커질수록 가공 면의 지름은 작아지며, 반지름 방향의 절삭깊이가 과다하면 공구의 회전 오차가 일부 상쇄되면서 지령 치수로부터 양(+)의 값으로 치수 오차는 증가하였고, 진원도도 나빠졌다.
- (4) 고속 엔드밀링에 의한 원통가공에서 반지름 방향의 절삭깊이는 0.5 mm이내, 공구의 날 1개당 이송량은 0.05 mm/tooth 이내로 하고, 주축의 회전을 고속으로 하면 진원도 향상과 더불어 고속·고정도·고표위의 가공이 가능하다.

후 기

이 연구는 서울산업대학교 기성희 연구비에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) 澤邊雅二, 外3名, "旋盤主軸回轉精度誤差の工作物眞圓度 寄與", 日本精密機械, 46卷 5號, pp. 576~583, 1980.
- (2) 三井公之, "精度診斷技術の研究", 日本機械學會論文集 48卷 425號, pp. 115~123, 1982.
- (3) 廉永夏, "工作機械의 切削理論", 東明社, 1983.
- (4) 이득우, "고속가공의 현상과 가공 특성", 금형저널 173호, pp. 144~158, 1999.
- (5) 김경균, 이용철, 이득우, 김정석, 황경현, "범용 머시닝센터에서 주축 증속기를 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.
- (6) 조덕섭, "머시닝센터에서 원통가공 시 절삭조건에 따른 진원도에 관한 연구", 서울산업대학교 석사 학위 논문, pp. 1~43, 1998.
- (7) 김병국, 이기용, 이득우, 김정석, "고속 볼 엔드 밀 가공에서 회전오차의 측정을 통한 표면 거칠기 예

- 측”, 韓國精密工學會 '97年度 春季學術大會論文集, pp. 889~893, 1997.
- (8) 정문섭, “Al합금의 고속가공에서 의한 치수오차와 표면정도 추이 고찰”, 韓國工作機械學會誌 第9卷 第3號, pp. 96~102, 2000.
- (9) 岩部洋育, 竹本和博, 今井純一, “エントミルによる高速加工に関する研究”, 日本機械學會論文集 63卷 612號, pp. 302~309, 1997.
- (10) 渡部 健, 田丸 敏昭, 建村憲治, “고속 · 고정밀 NC 금형 가공기”, 月刊 型技術 9月號, pp. 19~24, 1997.
- (11) 仲田信二, 八十川信介, “고정밀 금형의 고속 가공기”, 月刊 型技術 9月號, pp. 25~28, 1997.
- (12) 구자복, “표면 거칠기 측정 이론과 실제”, 중소기업진흥공단, pp. 27~46, 1992.
- (13) W. A Kline and R.E Devor, “The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces In End Milling”, Int. J. Mach. Tools Des. Res. Vol.23. No. 2/3 pp. 123~140, 1983.
- (14) 주식회사 양지원 공구, “종합 Catalog”, p. 272, 1999.