

엔드밀 가공의 정밀도 향상을 위한 최적정삭여유에 관한 연구

최종근*, 김형선**, 김성초*

(논문접수일 2003. 9. 25, 심사완료일 2004. 2. 17)

A Study on the Optimum Finish Allowance for Machining Accuracy Improvement in the End Milling Processes

Jong-Guen Choi*, Hyung-Sun Kim**, Sung-Cho Kim*

Abstract

A significant error in the end milling processes is generated due to using slender tools of which the strengths are not sufficient. In order to obtain the desired machining accuracy, therefore, it is general that at first the rough cut is implemented, then the finish cut is followed. The rough cut eliminates large volume and the finish cut does the remained part. This remaining portion after the rough cut is called as the finish allowance. Larger finish allowances make it hard to get precise dimensions at a following finish cut. Smaller finish allowances are helpful for good dimension, but it sometimes is responsible for inferior surface qualities and over cuts. This study suggests a guidance for the optimum finish allowance for machining accuracy improvement, in which the rough cuts are regulated to remain the desired margins without any over cuts. Some experiments were carried out with various cutting conditions including the change of tool strengths and depth of cuts, and also extended to up millings as well as down millings.

Key Words : Machining Error(가공오차), Rough Cut(황삭), Finish Cut(정삭), Finish Allowance(정삭여유), Tool Deflection(공구처짐)

1. 서론

엔드밀 가공은 금형, 항공기, 자동차 등의 산업분야에 널리 사용되고 있는 보편화된 절삭가공 공정으로써 다양한 형태의 많은 부품들이 이를 이용하여 생산되고 있다. 근래

에는 고속, 고정밀 공작기계의 개발과 제품의 품질향상에 대한 높은 관심으로 정밀 가공에 대한 관심이 더욱 고조되고 있다. 일반적으로 세장비가 큰 외팔보 형태의 공구형상을 갖는 엔드밀 가공은 가공 중 절삭력에 의하여 적지 않은 공구 처짐이 발생되며, 크게 향상된 공작기계의 정도에

* 순천대학교 기계·자동차공학부(jgchoi@sunchon.ac.kr)

주소: 540-742 전남 순천시 매곡동 315번지

** 한국산업인력공단 순천직업전문학교

도 불구하고 가공오차가 비교적 큰 공정으로 인식되고 있다.

따라서 이를 극복하기 위한 많은 연구가 해석적 혹은 실험적인 방법으로 진행되어 왔다.⁽¹⁾ Kline⁽²⁾ 등과 Kline과 Devor⁽³⁾는 공구의 런아웃(run out) 발생시 절삭력의 특성을 예측하기 위하여 절삭기구, 공구반지름, 칩두께 및 공구의 입·출각도 등을 고려한 절삭모델을 개발하였고, Sutherland와 Devor⁽⁴⁾는 공구의 처짐을 고려한 절삭력 모델을 개발하였다. Hascoët⁽⁵⁾ 등은 절삭공구의 변형을 고려한 새로운 공구 궤적의 결정을 통하여 절삭면의 오차를 최대한 줄이는데 중점을 두었으며, Lee와 Ko⁽⁶⁾는 엔드밀 가공에서 절삭력 모델에 의한 표면 형성 예측과 상향절삭에 있어서 가공정밀도를 향상에 관한 연구를 하였다. 최준근⁽⁶⁾은 엔드밀 가공의 가공오차 발생기구로서 동적효과와 재생효과를 고려한 유연 절삭력 모델을 제시하였으며, 양덕현⁽⁷⁾ 등은 공구변형과 절삭력, 그리고 표면 형상에 대한 특성을 파악하여 가공오차를 보정하는 정밀 가공법을 제안하였다.

한편, 이와 같은 많은 연구에도 불구하고 엔드밀 가공 중 공구처짐에 의한 가공오차는 이 공정의 생산성 향상에 여전히 큰 장애가 되고 있다. 일반적인 가공 상황을 고려할 때 현장 작업자 들은 작업시간의 단축과 요구되는 가공정밀도의 달성을 목적으로 황삭가공과 정삭가공의 양분된 절삭공정을 거친다. 황삭가공은 제거할 피삭재의 양이 충분히 남았을 때 공구의 절삭능력을 극대화하여 매 공구 진행마다 가급적 많은 양의 피삭재를 제거하는 공정이다. 황삭가공을 통하여 목표치수로부터 남게 되는 얼마간의 가공여유를 흔히 정삭여유라 하며, 정삭가공은 목표로 하는 치수정도와 표면정도의 달성을 목적으로 제한된 정삭여유를 가지고 반복 가공하는 공정이다. 그러나 황삭공정과 정삭공정의 양분점이 되는 정삭여유의 크기는 작업자의 경험과 습관에 의존하고 있는 실정이며, 그 결과로 얻어지는 가공 정도와 소요 시간 또한 작업자의 능력에 좌우되고 있다. 따라서 주어진 가공여유에 대한 최적 정삭여유가 주어진다면 가공정밀도와 생산성 향상에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

본 연구는 엔드밀 가공에 있어 정삭여유와 이로부터 얻어지는 가공정밀도와와의 관계를 규명함으로써 가공정밀도와 생산성 향상을 위해 요구되는 최적 정삭여유를 제시하고자 하였다. 이를 위해, 먼저 공구 지름에 따른 공구 강성의 변화에 따른 영향을 조사하였고, 다음으로 주어진 공구강성과 황삭여유에 대하여 정삭여유의 변화에 따른 가공오차 변화를 상향밀링과 하향밀링 각각에 대하여 관찰하였다. 또한 정삭가공의 반복에 따른 표면 거칠기의 변화를 통하여 정삭

회수와 표면정도와와의 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 엔드밀 가공의 특징과 가공오차

엔드밀 가공은 절삭날의 절입과 이탈이 반복적으로 이루어지는 단속절삭이며, 공구 반지름방향의 절입량에 해당하는 칩 두께 또한 지속적으로 변화한다. 따라서 절삭력은 공구의 회전각 위치에 따라 그 크기와 방향이 다르게 나타나며, 그에 따른 공구처짐도 계속 변화한다. 그 결과 가공면에 남게되는 가공오차는 공구처짐의 방향 및 절삭날의 위상(phase)에 따라 달라진다. 따라서 절삭날이 일정한 비틀림을 갖고 있는 일반적인 엔드밀 공구를 사용하는 경우, 가공면 형상은 어느 한 순간의 공구처짐에 의해서 결정되지 않게 된다. Fig. 1은 엔드밀 가공시 나타나는 가공면의 예로서 지름 10mm의 엔드밀로 공구 축방향 절입깊이(axial depth of cut: da)가 공구지름의 1.5배인 15mm, 공구 횡방향 절입깊이(radial depth of cut: dr)가 3.0mm일때 0.3mm의 정삭여유를 두고 황삭한 후, 가공여유 없이 1회 정삭하여 얻어진 가공면을 공구 경로 방향에서 바라본 형상이다. 앞서 설명한 바와 같이 가공면 형태는 굴곡이 있는 곡선으로 나타난다.

이러한 가공오차는 해석의 편의를 위하여 그림에서 보여지는 바와 같이 최대오차(maximum error)와 굴곡오차(waviness error)로 표시할 수 있다. 여기서 최대오차는 강

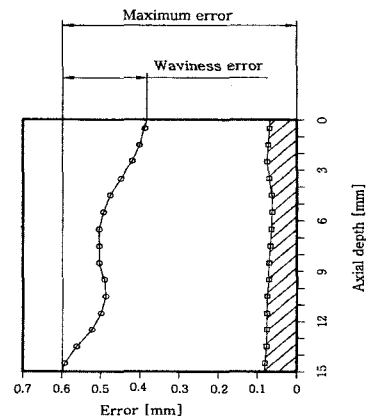


Fig. 1 Machined surface profiles by an end mill of 10mm diameter having 4 flutes of 30degree helix angle with the feed rates of 0.05mm/rev at the rough cut and 0.025mm/rev at finish cut, 480rpm, down cut and SKD61 work material

Table 1 Specification of the end mills

End mill	Specification		
Tool diameter [mm]	∅6	∅10	∅16
Number of flutes [EA]	4	4	4
Tool length [mm]	60	80	105
Flute length [mm]	15	25	40
Helix angle [°]	30	30	30

체공구를 가정하여 공구 처짐이 없이 얻어질 수 있는 이상적인 가공면에 대한 최대 평행이동 성분을 나타내며, 굴곡 오차는 최대오차와 최소오차사이의 차를 말한다. 이들의 크기 및 형상은 사용공구와 절입깊이를 비롯한 여러 가공조건에 따라 달라지게 된다.

3. 가공실험

3.1 피삭재 및 실험장치

피삭재는 프레스 다이, 다이캐스팅 다이, 압출 다이 등에 주로 활용되는 SKD61종의 열간 금형용 재료를 사용하였다. 가공실험을 위한 절삭공구로는 양지원사의 YG-1의 엔드밀을 사용하였으며, 실험에 사용된 전체 엔드밀의 상세한 제원은 Table 1과 같다.

엔드밀 가공실험을 위한 공작기계로는 Fanuc사의 M15 컨트롤러가 장착된 대우 중공업의 머시닝 센터(machining center)를 사용하였다. 엔드밀 가공면의 가공오차를 측정하기 위하여 Heidenhain사의 MT-25 길이 측정기(length gauge)가 머시닝센터에 장착되었으며, 이로부터 얻어지는 측정 데이터는 동일 회사의 ND-760 3축 표시장치(three axis display unit)에 전송된 후 컴퓨터에 저장되었다.

3.2 실험 조건

공구의 강성과 이에 따른 공구처짐은 공구의 지름과 매우 밀접한 관계가 있으므로 가공조건은 실험에 사용된 세 가지 엔드밀 지름을 기준으로 설정하였다. 공구의 날당 이송은 황삭가공시 일반적인 현장 자료를 참고하여 공구 지름의 0.005배로 하였고, 정삭 가공에서는 그 절반으로 하였다. 주축의 회전속도는 절삭속도를 일정하게 하기 위하여 각각 800, 480, 300rpm으로 하였다. 공구 축방향 절입깊이는 다양한 가공조건을 시험하기 위하여 공구지름의 0.5배, 1.0배, 1.5배의 세 가지 경우로 하였다. 초기 황삭여유(rough cut

Table 2 Cutting conditions

Diameters of the end mill [mm]	∅6	∅10	∅16	
Tool hang over lengths [mm]	35	45	60	
Tool strengths [N mm ²]	0.71 × 10 ⁷	2.35 × 10 ⁷	5.31 × 10 ⁷	
Feed rates [mm/flute] (0.005D)	rough	0.03	0.05	0.08
	finish	0.015	0.025	0.04
Spindle speeds [rpm]	800	480	300	
Axial depth of cuts [mm] (0.5D, 1.0D, 1.5D)	3,6,9	5,10,15	8,16,24	
Initial rough allowances [mm]	2	3	5	
Finish allowance [mm]	0.3, 0.2, 0.1, 0.0			
Cutting methods	Up and down millings			

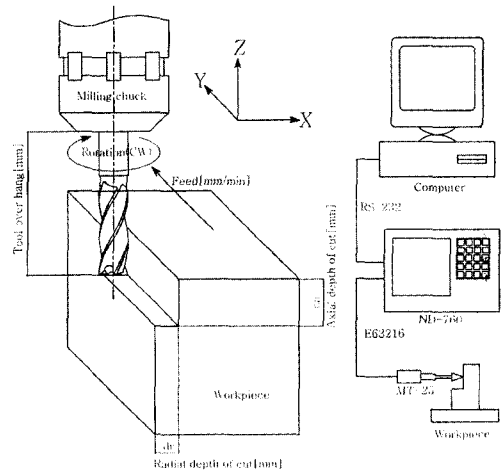


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

allowance: Rc)는 공구지름의 0.3배로 하였으며, 툴 홀더(tool holder)로부터의 공구 돌출길이(tool overhang length)는 엔드밀 날부의 길이보다 20mm 만큼 길게 하였다. 또한 공구의 강성은 머시닝 센터에 장착한 상태에서 공구 동력계(tool dynamometer)를 이용하여 여러 방향에 대하여 측정한 결과 방향에 따른 차이가 미미하였으므로 그 결과를 평균하였다. 이상의 가공조건을 정리하면 Table 2와 같다.

공작물의 고정은 머시닝 센터의 테이블에 장착된 바이스를 이용하여 설치하였으며, 공구는 콜릿(collet)과 툴 홀더를 이용하여 장착하였다. 정확한 절입량의 조절과 측정을

위해 먼저 가공 소재의 표면에 기준면을 형성하였다. 이를 위해 설치된 가공 소재의 한 면을 5회 이상 반복가공 하였고, 이렇게 함으로써 공구 런아웃과 공구 처짐에 의한 오차를 최소화할 수 있었다. 이와 같은 과정으로 준비된 측정기준면에 대하여 초기 황삭여유에서 설정된 정삭여유를 남기고 황삭을 하였다. 황삭 가공후 이송속도를 반으로 낮추고 남겨진 정삭여유를 더하여 주어진 목표치수로 정삭 가공을 실시하였다. Fig. 2는 설명한 실험방법의 개략도이다. 가공 오차에 대한 측정의 신뢰성을 유지하기 위하여 그림에 나타난 바와 같이 가공 완료후 가공물을 마이크로로부터 분리하지 않고 측정하였으며, 측정된 가공오차는 RS232C 직렬포트를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 측정이 완료되면 다시 정삭과 측정을 4회 반복하면서 정삭회수에 따른 가공오차를 저장하였다. 또한 계획된 가공조건에 따라 정삭여유와 축방향 절입깊이를 달리하여 실험을 반복하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 상향밀링 실험

Fig. 3 ~ Fig. 5는 상향밀링에서의 정삭여유와 가공오차에 대한 실험 결과를 나타낸다. 공구 축방향 절입깊이(d_a)를 사용 엔드밀 지름과 동일하게 하고, 공구 횡방향 절입깊이(d_r)를 0.1mm부터 0.1mm씩 증가시키면서 가공하였다. 그림에 나타난 바와 같이 상향밀링의 경우 공구처짐이 공작물 방향으로 나타나고, 공구 끝 부분으로 갈수록 그 값이 커짐을 알 수 있다. 지름 6mm, 10mm의 엔드밀 가공에서는 공구 횡방향 절입깊이가 0.8mm이상일 때, 그리고 지름 16mm 엔드밀 가공에서는 공구 횡방향 절입깊이가 1.5mm 이상일 때 가공면의 하단부에서 과절삭(over cut)이 발생하였다. 따라서 상향밀링에서 공구 횡방향의 절입깊이가 공구 지름의 0.8배 이상이 되면 과절삭을 일으키게 됨을 보였으며, 그 결과 상향밀링으로는 주어진 가공정밀도를 얻을 수 없었다.

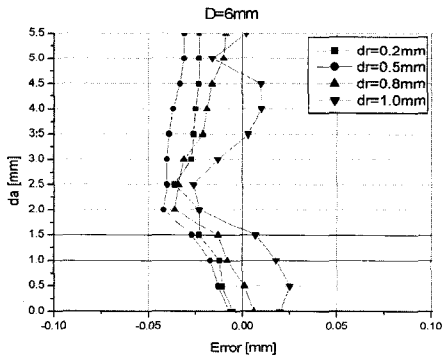


Fig. 3 Machining errors in the up milling ($D=\varnothing 6\text{mm}$, $d_a=5.5\text{mm}$, $f_z=0.03\text{mm}$, $N=800\text{rpm}$)

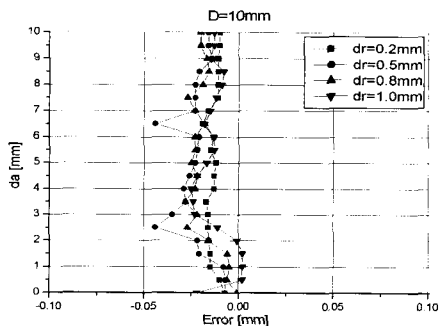


Fig. 4 Machining errors in the up milling ($D=\varnothing 10\text{mm}$, $d_a=10.0\text{mm}$, $f_z=0.05\text{mm}$, $N=480\text{rpm}$)

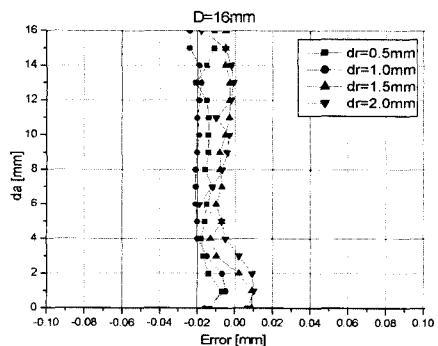


Fig. 5 Machining errors in the up milling ($D=\varnothing 16\text{mm}$, $d_a=16.0\text{mm}$, $f_z=0.08\text{mm}$, $N=300\text{rpm}$)

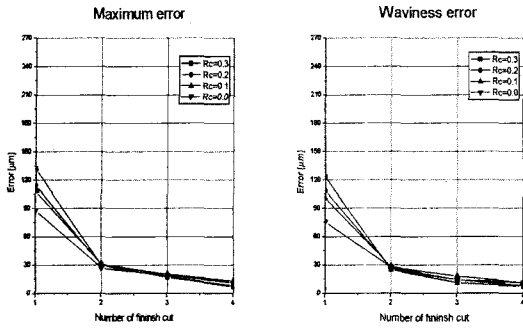


Fig. 6 Change of the maximum and waviness errors according to the number of finish cut ($D=\emptyset 6\text{mm}$, $d_a=3.0\text{mm}$, $R_c=2.0\text{mm}$, $N=800\text{rpm}$)

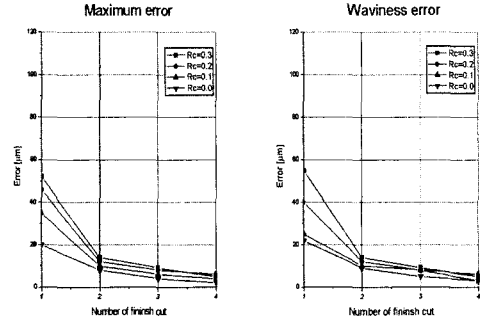


Fig. 9 Change of the maximum and waviness errors according to the number of finish cut ($D=\emptyset 10\text{mm}$, $d_a=5.0\text{mm}$, $R_c=3.0\text{mm}$, $N=480\text{rpm}$)

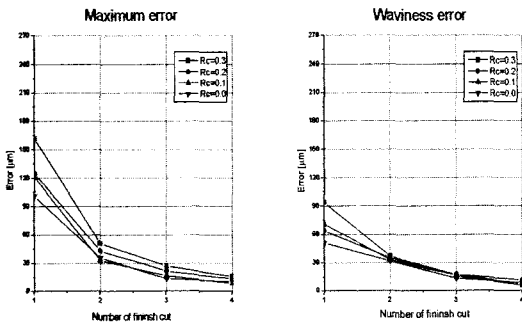


Fig. 7 Change of the maximum and waviness errors according to the number of finish cut ($D=\emptyset 6\text{mm}$, $d_a=6.0\text{mm}$, $R_c=2.0\text{mm}$, $N=800\text{rpm}$)

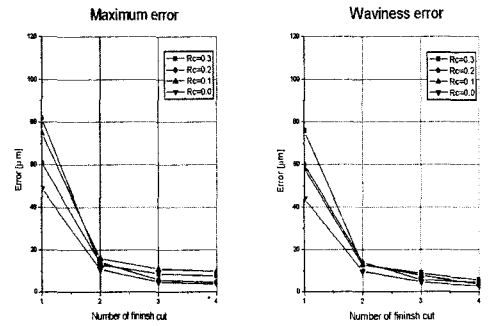


Fig. 10 Change of the maximum and waviness errors according to the number of finish cut ($D=\emptyset 10\text{mm}$, $d_a=10.0\text{mm}$, $R_c=3.0\text{mm}$, $N=480\text{rpm}$)

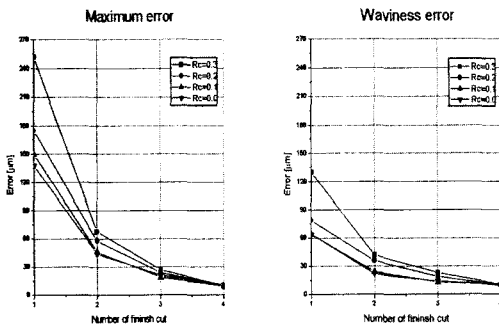


Fig. 8 Change of the maximum and waviness errors according to the number of finish cut ($D=\emptyset 6\text{mm}$, $d_a=9.0\text{mm}$, $R_c=2.0\text{mm}$, $N=800\text{rpm}$)

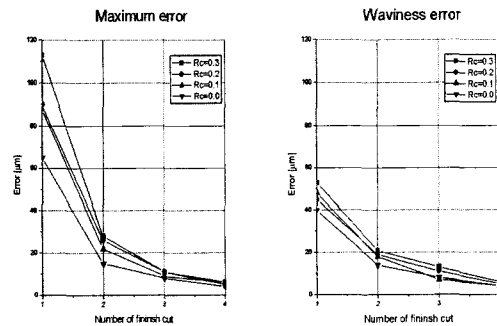


Fig. 11 Change of the maximum and waviness errors according to the number of finish cut ($D=\emptyset 10\text{mm}$, $d_a=15.0\text{mm}$, $R_c=3.0\text{mm}$, $N=480\text{rpm}$)

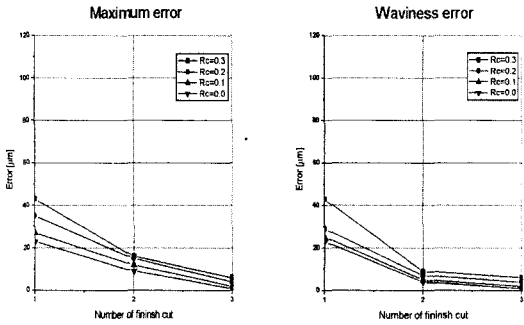


Fig. 12 Change of the maximum and waviness errors according to the number of finish cut(D=∅16mm, da=8.0mm, Rc=5.0mm, N=300rpm)

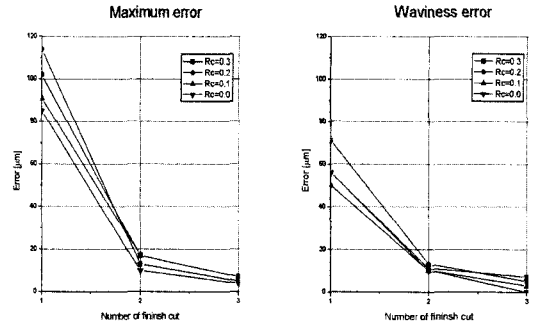


Fig. 14 Change of the maximum and waviness errors according to the number of finish cut(D=∅16mm, da=24.0mm, Rc=5.0mm, N=300rpm)

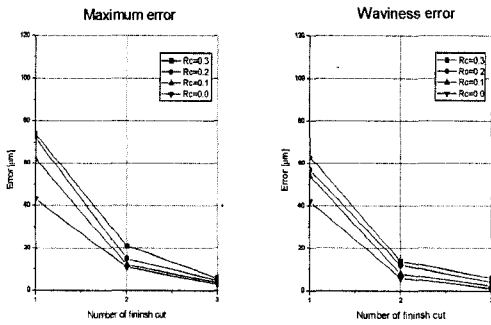


Fig. 13 Change of the maximum and waviness errors according to the number of finish cut(D=∅16mm, da=16.0mm, Rc=5.0mm, N=300rpm)

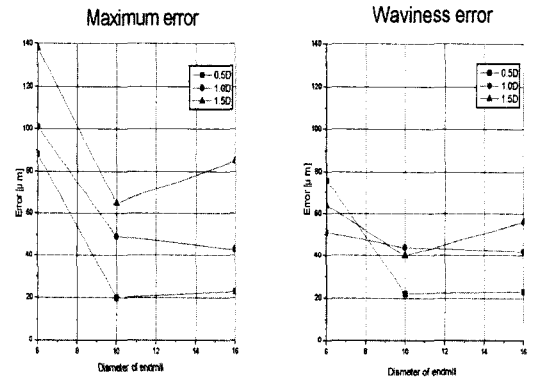


Fig. 15 Change of the maximum and waviness errors according to the end mill diameters

공을 반복하였다. 주어진 예에서 보여지는 바와 같이 하향 밀링의 경우 공구 횡방향의 절입 깊이에 관계없이 모든 경우 공구치침이 공작물과 멀어지는 방향으로 발생하여 미절삭이 나타났다. 이러한 미절삭량은 정삭회수의 증가에 따라 급격히 감소하지만, 정삭이 1회 또는 2회만 이루어졌을 때는 정삭여유의 크기에 큰 영향을 받았다. 따라서 산업현장에서 생산성을 고려하여 정삭회수가 1회 또는 2회로 제한되는 일반적인 경우, 정삭여유를 최소(여기서 0)로 하였을 때 가장 우수한 치수 정밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 10 μ m 이내의 치수정밀도를 얻기 위해서는 정삭여유에 관계없이 지름 6mm의 엔드밀 가공에서는 4회 이상, 지름 16mm의 엔드밀 가공에서는 2회 혹은 3회의 정삭이 필요하였다.

한편, Fig. 15는 공구지름을 달리하고, 또 이에 비례하여 공구 축방향 절입깊이를 공구지름의 0.5배, 1배, 1.5배로 변화시키면서 정삭가공을 1회 실시하였을 때 나타나는 치수 정밀도를 표시한다. 이 결과는 동일한 절입깊이에 대하여 공구강성이 증가할 때 치수 정밀도는 향상된다는 예상되는 경우와는 달리, 공구지름에 비례하는 공구축 방향 절입깊이가 증가하는 보다 일반적인 경우를 보여 준다. 그림에서 공구 지름이 6mm에서 10mm로 증가할 때는 가공 정밀도가 많이 개선되지만, 16mm에서는 별다른 개선이 없음을 알 수 있다. 또한, 동일 지름의 엔드밀에 대해서는 공구 축방향 절입깊이가 증가함에 따라 최대오차는 증가하나, 굴곡오차는 이와 무관하게 나타날 수 있음을 알 수 있다. 이로부터 공구 축 방향 절입깊이의 증가에 따라 공구 강성을 증가시

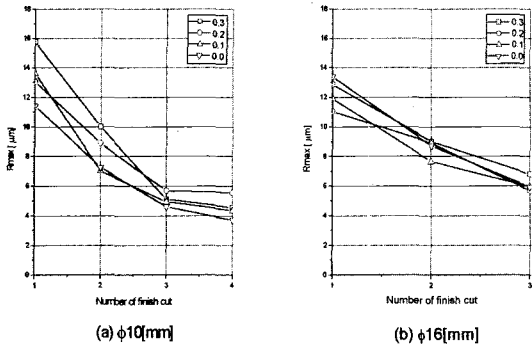


Fig. 16 Relationship between surface roughness according to the number of finish cut

키는 것이 치수 정밀도의 향상에 도움이 되지만, 공구 축 방향 절입깊이가 어느 이상이 될 경우에는 공구 강성을 더욱 증가시켜야 원하는 치수 정밀도를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 정삭회수와 표면 거칠기

Fig. 16은 지름 10mm와 16mm의 엔드밀 가공시 정삭회수에 대한 최대높이 거칠기(maximum height roughness: Rmax)를 나타낸 것이다. 정삭회수가 증가함에 따라서 표면 거칠기가 점진적으로 감소하게 되고, 정삭여유가 작을수록 표면 거칠기도 원하는 정도에 빨리 도달하게 된다. 일반적인 절삭가공에서 요구하는 운동부 부품의 표면 거칠기인 6.3S(Rmax: 5.2~7.1 μ m)이하의 표면정도를 얻으려면 정삭회수를 3회 이상으로 해야 됨도 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 금형강의 엔드밀 가공에서 가공정밀도 향상 및 가공시간 단축을 위한 최적 정삭여유를 얻기 위하여 다양한 실험적 접근을 시도하였다. 먼저, 가공조건에 따른 정삭여유와 가공정밀도 사이의 관계를 규명하기 위해 공구 강성, 공구 축방향 절입깊이, 정삭여유를 인자로 하여 그 영향을 조사하였다. 다음으로 가공방법에 따른 차이를 알아보기 위하여 상향밀링과 하향밀링 각각에 대한 가공 특성을 살펴보았다. 또한, 정삭여유와 표면정도와와의 관계 및 정삭회수에 따른 표면정도의 변화를 관찰하기 위한 실험을 하였다. 이상의 실험적 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 상향밀링의 경우 주어진 공구에 대하여 공구 횡방향 절입깊이 일정 값 이상이 되면 과도한 공구 처짐으로 과절삭이 발생하며, 이는 공구 강성이 작을수록 쉽게 일어난다.
- (2) 하향밀링의 경우 엔드밀의 강성이 작을수록, 그리고 공구 축방향 절입깊이가 클수록 최대오차와 굴곡오차가 증가한다. 따라서 강성이 작은 엔드밀 가공에서는 이에 대한 고려가 요구된다.
- (3) 하향밀링에서 정삭회수가 1회 혹은 2회로 제한될 때 정삭여유는 최소화하는 것이 치수 정밀도에 도움이 되며, 정삭회수가 증가하면 그 영향은 적어진다.
- (4) 하향밀링에서 정삭회수가 증가하면 가공면의 최대오차와 굴곡오차는 점진적으로 감소하고, 표면 거칠기도 향상된다.
- (5) 가공 정밀도 향상을 위해서는 가능한 강성이 큰 엔드밀을 가지고 절입깊이를 작게 해야하며, 본 연구에서 10 μ m 이내의 가공오차를 갖는 가공정밀도를 얻기 위해서는 3회 이상의 정삭가공이 필요하였다. 특히 강성이 작은 경우에는 정삭회수를 1, 2회 추가해야만 원하는 정도를 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 순천대학교 공과대학 학술재단의 해외연수 지원에 의해 수행되었음.

참고 문헌

- (1) Yang, Min-Yang, and Choi, Jong-Guen, 1997, "On-line Tool Deflection Compensation System for Precision End-milling," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 21, No. 2, pp. 189~198.
- (2) Kline, W. A., Devor, R. E., and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 22, No. 1, pp. 7~22.
- (3) Kline, W. A., and Devor, R. E., 1983, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 23, No. 2/3, pp. 123~140.

- (4) Sutherland, J. W., and Devor, R. E., 1986, "An improved Method for cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 108, pp. 269~279.
- (5) Hascoët, J. Y., Dépincé, P., and Seo, T.-I., 1998, "A study on the Compensation of Milling Errors by Regenerating of Tool Trajectory," *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 137~144.
- (6) Lee, Sang-Kyu, and Ko, Sung-lim, 1999, "Improvement of the Accuracy in Machining Deep Pocket by Up milling," *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 220~236.