



임계 런아웃이 표면 거칠기와 요철의 평균 간격에 미치는 영향

김수진^{a*}, 김동현^{a,b}

Influence of Critical Runout on Surface Roughness and Mean Width of Profile Elements

Su-Jin Kim^{a*}, Dong-Hyun Kim^{a,b}^a School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University^b Gyeongbuk Research Institute of Vehicle Embedded Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received	26	March	2020
Revised	21	May	2020
Accepted	29	May	2020

Keywords:

Critical runout
Surface roughness
Mean width of profile elements
Side milling
Machining

ABSTRACT

The runout of the end mill with two teeth affects the machined micro profile during side milling. In this research, the influence of critical runout on the surface roughness and mean width of profile elements is studied using a theoretical model, geometrical simulation, and experiment. The surface roughness values obtained using the theoretical model and via geometrical simulation were similar. However, they were lower than the value obtained experimentally because of the cutting mechanism. The average width of the profile element is equal to the feed per tooth when the runout is lower than the average critical runout; otherwise, it is double. Generally, runout increases the surface roughness. However, it does not affect the roughness if it is greater than the maximum critical runout.

1. 서론

밀링 표면형상은 기본적으로 공구인선 궤적뿐만 아니라 공구의 런아웃, 휨, 진동 같은 복잡한 운동의 영향을 받아 생성된다^[1]. 그중 런아웃(runout)은 공구의 중심과 회전 중심이 일치하지 않는 현상이다. 동작기계 주축의 진원도 오차가 원인일 수 있고, 스피들이 정확하더라도 홀더와 공구의 조립 오차로 인해 편심이 발생할 수 있다. 런아웃이 발생하면 공구 날 각각이 제거하는 칩 두께가 서로 달라 순간 절삭력에 차이가 생긴다^[2-4]. 특히 런아웃은 두 날의 가공 깊이 차이를 발생시켜 최종 표면 거칠기(surface roughness)에 영향을 미친다^[5-10]. 기존에는 런아웃을 고려한 평면밀링^[5,6]과 측면밀링^[7]의 윤곽을 연구하였다. 또한 런아웃이 볼엔드밀 가공 표면에 미치는 영향을 시뮬레이션과 실험으로 분석하고^[8,9], 평엔드밀 평면 가공 시 런아웃이 표면에 남기는 절삭 흔적을 연구하였다^[10]. 하지만 런아웃이 표면거칠기에 영향을 미치는 영역과 미치지 않는

영역을 나누는 임계값 그리고 런아웃과 요철 간격에 대한 연구는 부족했다.

본 논문은 공구반경, 날당 이송, 런아웃이 표면 거칠기와 요철의 평균 간격(mean width of profile elements)에 미치는 영향을 이론과 시뮬레이션으로 분석한다. 특히 런아웃이 표면 거칠기에 영향을 미치는 범위와 미치지 않는 조건을 구분하는 임계 런아웃(critical runout)을 유도하고 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다.

2. 임계 런아웃 모델

2.1 임계 런아웃

이론적인 밀링 표면은 날당 이송 간격의 원호들이 만드는 오목한 골과 볼록한 산으로 구성된다. 공구를 회전축에 장착한 후 발생하는 런아웃은 두 날이 깊이 차이 즉 골과 골의 차이를 만들고 산의 높이를 증가시켜 표면 거칠기에 영향을 준다.

* Corresponding author. Tel.: +82-55-772-1636

E-mail address: sujinkim@gnu.ac.kr (Su-Jin Kim).

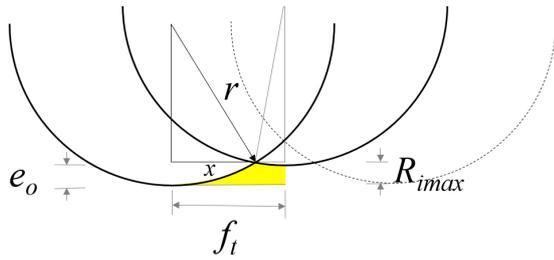


Fig. 1 Runout, feed per tooth and ideal surface roughness in case of side milling

두 날 엔드밀로 측면을 가공할 때 Fig. 1과 같이 칩째 날이 만드는 원호의 깊이와 둘째 날이 만드는 원호의 깊이보다 런아웃만큼 깊고 두 원호의 교점인 산의 위치가 높은 원호 쪽으로 이동한다. 그림에서 이론적 표면 거칠기는 공구반경, 골과 산의 수평 거리, 런아웃, 날당 이송 교점의 식으로 유도된다.

$$R_{imax} = r - \sqrt{r^2 - x^2} = r + e_r - \sqrt{r^2 - (f_t - x)^2} \quad (1)$$

where,

R_{imax} : Ideal maximum roughness

r : Tool radius

x : Horizontal distance from valley to peak

e_r : Radial runout of two teeth

f_t : Feed per tooth

날당 이송과 런아웃이 공구 반경에 비해 아주 작은 일반 가공조건에서 위 방정식의 작은 항을 생략해 산의 위치와 이론적 최대 표면 거칠기(ideal maximum roughness) 근사식을 얻을 수 있다.

$$R_{imax} \approx \frac{x^2}{2r} \quad (2)$$

where, $x \approx \frac{f_t}{2} + \frac{re_o}{f_t}$ and $x \leq f_t$

공구반경이 5 mm이고 날당 이송이 0.2 mm/tooth인 경우의 런아웃에 따른 이론적 표면 윤곽 그래프는 Fig. 2와 같다. 런아웃이 두 날의 절삭 깊이 차이를 만드는데 이때 깊은 골과 높은 골이 만나는 산의 위치 x 가 높은 골 방향으로 이동하면서 높아져 최대 표면 거칠기가 커진다. 런아웃이 계속 증가해 산의 위치와 높이가 높은 골과 일치하는 임계점을 초과하면 한 날만 표면을 만들기 때문에 표면 거칠기가 더 이상 증가하지 않게 된다.

산의 위치가 두 번째 골의 위치와 같아지는 최대 임계 런아웃(maximum critical runout)을 공구반경과 날당 이송의 식으로 유

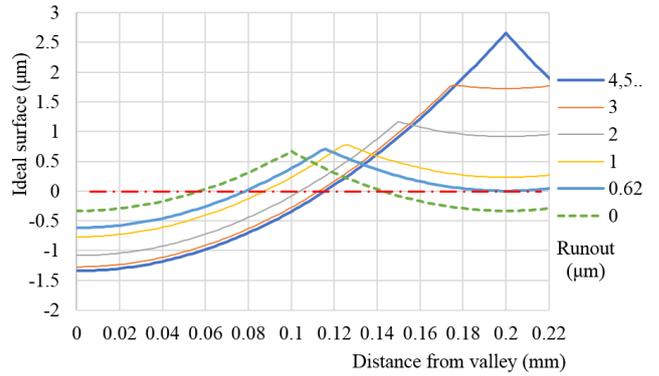


Fig. 2 Runout and ideal surface profile

도하면 다음과 같다.

$$e_{cmax} \approx \frac{f_t^2}{2r} \quad (3)$$

e_{cmax} : Maximum critical runout

Fig. 2에서 런아웃이 0.62 μm 미만이면 윤곽이 중심선과 두 점에서 교차해 요철의 간격이 날당 이송과 같고, 초과하면 한 점에서만 교차해 요철의 간격이 날당 이송의 두 배가 됨을 볼 수 있다. 이론적인 윤곽을 적분하고 거리로 나누어 중심선을 구하고, 중심선이 윤곽의 높은 골과 접하는 평균 임계런아웃(average critical runout)을 공구 반경과 날당 이송의 식(4)로 나타내었다.

$$e_{ca} \approx 0.077 \frac{f_t^2}{r} \quad (4)$$

e_{ca} : Average critical runout

평균 임계 런아웃은 요철의 간격 뿐 아니라 평균 표면 거칠기에도 영향을 미친다. 중심선에서 윤곽까지의 높이를 적분하고 길이로 나누어 이론적 평균 거칠기(ideal average roughness)를 런아웃, 공구반경, 날당 이송의 근사 식(5)로 나타내었다.

$$R_{ia} \approx \frac{f_t^2}{32r} + \frac{4r}{3f_t^2} e_r^2 \quad \text{if } 0 \leq e_r < e_{ca} \quad (5)$$

$$R_{ia} \approx \frac{1}{2} e_r - \frac{r}{2f_t^2} e_r^2 \quad \text{if } e_{ca} \leq e_r < e_{cmax}$$

R_{ia} : Ideal average roughness

공구반경이 5 mm인 엔드밀의 경우 런아웃과 날당 이송에 따른 이론적 최대 표면 거칠기와 평균 표면거칠기는 Fig. 3과 같다. 일반적으로 런아웃은 식 (2) 및 식 (5)과 같이 최대 표면 거칠기와 평균 표면거칠기를 증가시킨다. 평균 임계값 식 (4)를 지나면 점점 평균 거칠기의 기울기가 작아지며, 최대 임계값 식 (3)을 초과하면

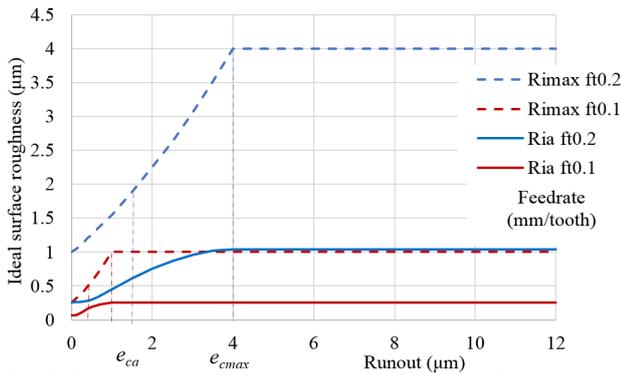


Fig. 3 Critical runout, feed per tooth and ideal surface roughness

더 이상 표면 거칠기가 증가하지 않음을 알 수 있다. 날당 이송이 0.2 mm/tooth인 그래프는 청색이고 0.1 mm/tooth인 그래프는 붉은색으로 날당 이송이 증가하면 표면 거칠기와 임계 런아웃도 커진다.

2.2 가공 표면 시뮬레이션

런아웃에 따른 가공표면을 가시화 하고 기하학적인 표면 거칠기를 예측하기 위해서 가공 표면 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하였다. 개발에 C++ 언어와 개방형 그래픽(OpenGL) 라이브러리를 사용하였고 비주얼 스튜디오(Visual studio)로 프로그래밍 하였다. 소재는 Fig. 4와 같이 x축과 z축에 평행한 면을 0.01 mm 간격의 행렬로 나누어 각 위치의 y방향 깊이를 저장하는 자료구조를 사용하였고 공구는 원통형으로 단순화 하였다. 공구를 날당 이송만큼 x방향으로 이동하고 짝수 번째만 런아웃만큼 y방향으로 이동해 원통과 겹치는 요소의 깊이를 변경해 가공을 시뮬레이션 하였다.

개발한 시뮬레이션 소프트웨어로 예측한 마이크로 표면 형상에의 x축 방향 프로파일을 추출해 참고문헌^[7]의 측정 프로파일과 비교하였다. 또한 요철의 평균거리와 표면 거칠기의 이론, 시뮬레이션, 실험을 서로 비교 검증 하였다. 비교에 이용한 공구의 직경은 12.7 mm이고 날당 이송은 0.24 mm이다. Fig. 5(a)는 런아웃이 0.3 µm로 식 (4)의 평균 임계값 0.7 µm보다 작은 경우로 시뮬레이션과 실험 모두 이론처럼 두 날이 모두 표면을 창성하고 있어 요철의 평균 간격 S_m 이 0.24 mm로 날당 이송과 같다. 최대 거칠기 R_{max} 는 식 (2)의 이론이 1.29 µm이고 시뮬레이션이 1.27 µm로 참고문헌의 측정과 일치한다. 평균 거칠기 R_a 도 식 (5)의 이론이 0.30 µm이고 시뮬레이션이 0.31 µm로 모두 실험과 일치한다. Fig. 5(b)는 런아웃이 5.0 µm로 식 (3)의 최대 임계값 4.5 µm 보다 커서 이론처럼 한 날만 표면을 만들기 때문에 요철의 평균 간격이 0.48 mm로 날당 이송의 두 배이다. 최대 거칠기는 이론은 4.53 µm이고 시뮬레이션

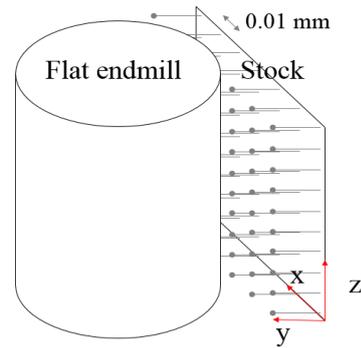


Fig. 4 Geometrical simulation of side milling using depth buffer

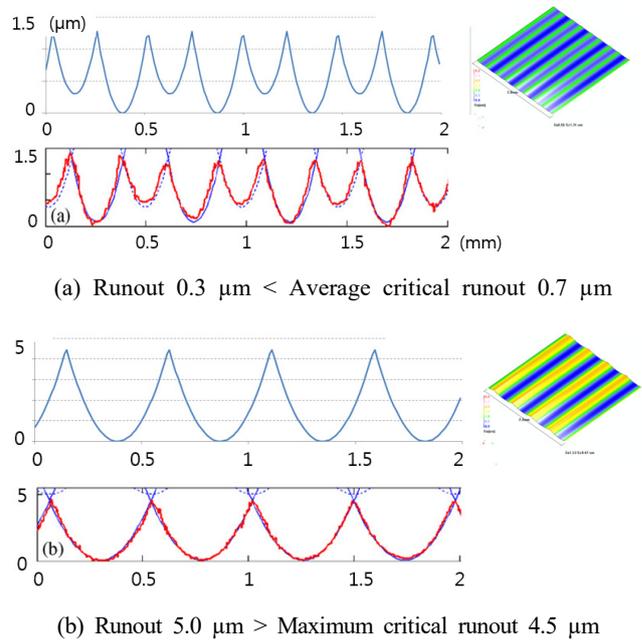


Fig. 5 Critical runout and surface profile in geometrical simulation and aluminum milling experimentation^[7]

은 4.30 µm로 작은 차이는 시뮬레이션 분해능이 산의 꼭짓점을 정확히 예측하지 못했기 때문이고 시뮬레이션과 실험의 윤곽이 일치한다. 평균 거칠기도 이론과 시뮬레이션 모두 1.13 µm로 실험과 같다. 요철의 평균 간격과 표면 거칠기를 이론식, 시뮬레이션, 실험 간에 비교 검증했을 때 이론과 시뮬레이션이 일치하고 시뮬레이션 프로파일과 참고문헌의 측정 프로파일이 일치했다.

Fig. 5의 두 경우 모두 기하학적 시뮬레이션과 참고문헌의 측정 프로파일이 일치하고 있는 이유는 가공성이 좋은 알루미늄 6061-T6 소재를 작은 축방향 가공깊이 0.5 mm와 반경방향 가공깊이 0.5 mm 조건으로 가공해 절삭력과 공구 힘을 최소화 했고 느린 회전수 150 rpm과 300 rpm을 사용해 진동이 발생하지 않았기 때문으로 사료된다.

Table 1 Experimental equipments in steel machining test

Equipments	Model	Specification
Machining center	Vesta 1000	Spindle(max): 10,000 rpm Feed(max): 36 m/min
LVDT sensor	TESA Tronic 10	Resolution / range 0.2 μm / $\pm 10 \mu\text{m}$ 0.1 μm / $\pm 5 \mu\text{m}$
Roughness tester	Mitutoyo SJ-201	Resolution / range 0.1 μm / 100 μm 0.01 μm / 10 μm
Tool	OSG	Flat endmill $\phi 10$ mm, 2 edges, carbide
Workpiece	SM45C	100 \times 100 \times 50 mm

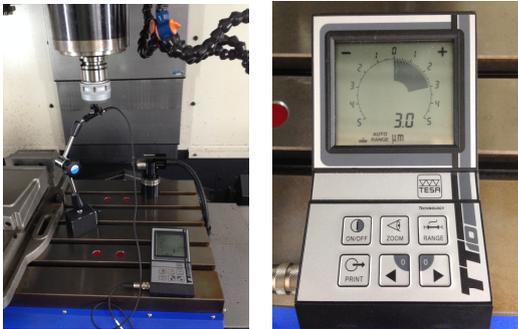


Fig. 6 Runout measurement with LVDT sensor

3. 런아웃 실험

3.1 실험장치 및 방법

이론과 시뮬레이션 그리고 참고문헌의 실험과 비교해 검증한 런아웃과 표면거칠기의 관계를 확인하기 위해서 추가 실험을 진행하였다. 런아웃과 표면 거칠기 관계 실험에 사용한 공작기계, 변위 센서, 조도계, 공구, 소재는 Table 1과 같다. 머시닝센터에 직경 10 mm 초경 엔드밀을 장착하고 Fig. 6과 같이 LVDT 센서로 공구의 런아웃을 측정하였다. 고탄소강 SM45C를 평엔드밀로 측면 가공하고 표면을 접촉식 표면 거칠기 측정기로 측정하였다. 실험 조건은 Table 2와 같이 공구사의 추천 정삭 조건을 사용하였다. 날당 이송이 0.2 mm/tooth일 때 식 (3)에 의한 평균 임계 런아웃은 0.62 μm 이고 최대 임계 런아웃은 4.0 μm 으로 실험의 런아웃 조건 0.3 μm , 2.5 μm , 11.0 μm 이 각각 임계값 미만 사이 초과 영역에 분포해 있다.

3.2 시뮬레이션과 실험 결과

날당 이송이 0.2 mm/tooth일 때 런아웃에 따른 가공표면의 시뮬레이션 결과와 실험의 측정결과를 Fig. 7에 비교하였다. Fig. 7(a)은 런아웃 0.3 μm 가 식 (4) 평균 임계값 0.62 μm 보다 작아

Table 2 Experimental conditions in steel machining test

Condition	Unit	Value
Spindle	rpm	5000
Feed per tooth	mm/tooth	0.1, 0.2
Depth of cut	mm	Axial 5, Radial 0.05
Runout	μm	0.3, 2.5, 11

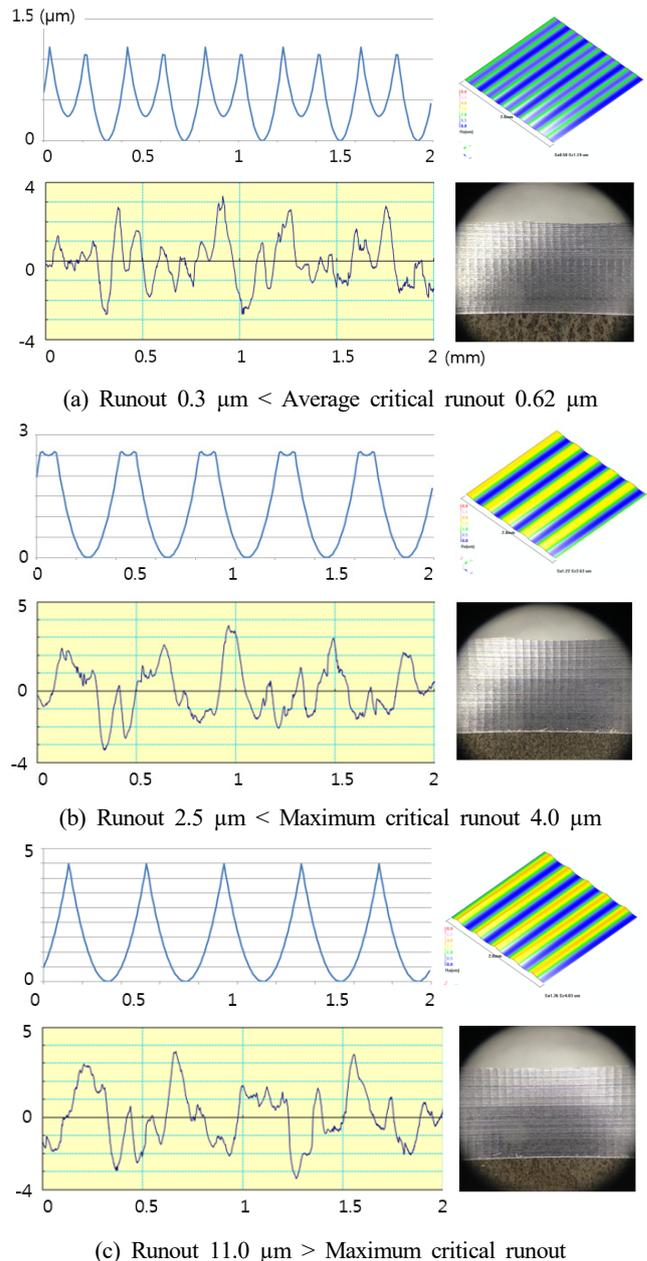


Fig. 7 Critical runout and surface profile in geometrical simulation and steel milling experiment

두 날이 모두 표면 윤곽을 만들기 때문에 요철의 평균 간격 S_m 이 0.2 mm로 날당 이송과 일치한다. 평균 거칠기 R_a 는 식 (5)의 이론

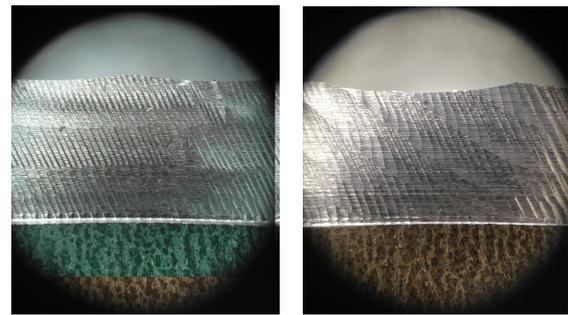
값과 기하학적 시뮬레이션이 0.27 μm 로 일치하지만 실험의 측정값 0.94 μm 보다는 작다. Fig. 7(b)는 런아웃 2.5 μm 가 평균 임계값과 식(3)의 최대 임계값 4.0 μm 사이에 있는 경우로 깊은 골만 윤곽의 중심선을 지나고 높은 골은 중심선과 만나지 않아 요철의 평균 간격이 날당 이송의 두 배인 0.4 mm로 이론과 시뮬레이션이 일치하고 있다. 윤곽의 평균 거칠기는 식 (5)의 이론값 0.86 μm 와 시뮬레이션 0.87 μm 가 일치하지만 실험의 측정값은 1.19 μm 로 이상적인 표면 거칠기보다 크다. Fig. 7(c)는 런아웃 11.0 μm 가 최대 임계값 4.0 μm 보다 큰 경우로 한 날만 표면을 만들기 때문에 요철의 평균 간격이 0.4 mm로 회전당 이송과 같다. 평균 거칠기는 이론값 1.00 μm 와 시뮬레이션 값 1.03 μm 가 일치하지만 실험의 측정값은 1.29 μm 로 기하학적인 표면 거칠기보다 크다.

요철의 평균 간격은 런아웃이 평균 임계값 미만인 Fig. 7(a)에서는 날당 이송과 같았고, 이상인 Fig. 7(b)와 (c)에서는 회전당 이송과 같았다. 또한 런아웃이 최대 임계값 보다 작은 조건에서는 표면 거칠기가 런아웃의 영향을 받을 수 있다.

3.3 오차 원인 분석

알루미늄 소재를 아주 낮은 깊이와 속도로 가공한 Fig. 5의 표면 프로파일은 시뮬레이션과 일치하지만, 탄소강을 깊고 빠른 조건으로 가공한 Fig. 7의 표면은 재료의 특성과 공구의 변형으로 인해 시뮬레이션 보다 거칠었다. 그 이유는 재료의 절삭성과 사용된 가공 조건 차이로 볼 수 있다. 첫째 알루미늄의 절삭성이 구조용 탄소강에 비해서 아주 높기 때문이다. Al6061-T6의 비절삭에너지(Specific cutting energy)는 600 N/mm^2 로 구조용 탄소강 SM54C의 비절삭에너지 1,800 N/mm^2 에 비해 약 1/3배 작다. 둘째 두 실험에 사용된 가공 깊이와 공구형상의 차이로 인해 공구인선이 최종 표면을 창성할 때 칩의 단면적이 약 1/4배 작다. 재료의 특성을 함께 고려하면 알루미늄의 순간 절삭력이 탄소강에 비해 약 1/12배 작다. 셋째 알루미늄 가공에 사용된 축방향 가공깊이 0.5 mm와 아주 느린 회전수 150 rpm와 300 rpm는 동적 영향을 받지 않는 조건이다. 탄소강 가공에 사용된 축방향 가공깊이 5 mm와 주축 회전수 6000 rpm은 생산성을 고려한 일반적인 정삭 조건이지만 공구의 강성이 낮을 경우 chatter가 발생해 표면이 거칠어질 수 있다.

동적 절삭 현상이 표면 거칠기를 크게 증가시키는 경우를 관찰하기 위해서 다른 조건은 일치시키고 직경 10 mm이고 길이 70 mm인 HSS엔드밀을 사용해 상향 측면밀링 실험을 하였다. HSS는 초경보다 탄성계수가 작고 공구 길이가 길어서 강성이 낮다. Fig. 8은 가공표면 사진으로 낮은 공구 강성으로 인해 발생한 chatter 자국을 볼 수 있다. Fig. 8(a)는 런아웃이 1.2 μm 일 때 평균 거칠기 1.37 μm 인 거친 표면을 나타내고 Fig. 8(b)는 런아웃이 4.6 μm 일 때 평균 거칠기 2.19 μm 인 거친 표면을 보여주고 있다. 채



(a) Runout 1.2 μm (b) Runout 4.6 μm
Fig. 8 Runout and dynamic chatter surface

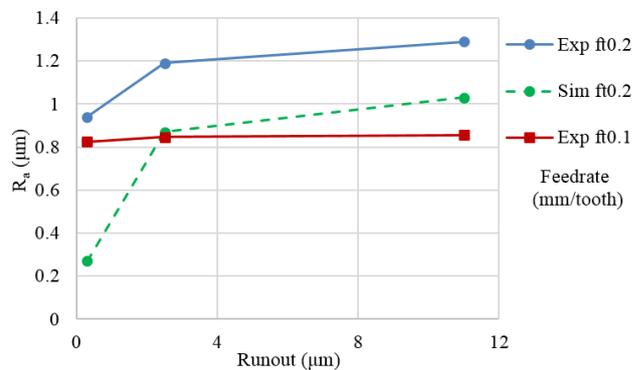


Fig. 9 Critical runout, feed per tooth and experiment roughness

터가 발생하는 경우에도 공구의 런아웃이 표면 거칠기에 영향을 미침을 알 수 있다.

3.4 임계 런아웃과 평균 거칠기

Fig. 9는 런아웃 0.3, 2.5, 11.0 μm 에 대한 평균 거칠기의 변화를 날당 이송과 실험 시뮬레이션에 따른 세 가지 곡선으로 보여준다. 날당 이송이 0.2 mm/tooth일 때 평균 거칠기 실험 결과는 청색 실선으로 기하학적 시뮬레이션은 녹색 점선으로 표시하였다. 실험과 시뮬레이션에서 모두 런아웃이 최대 임계값 4.0 μm 미만이면 평균 거칠기에 많은 영향을 미치며 이상이면 런아웃의 영향이 작아지는 것으로 나타났다. 실험 표면 거칠기가 시뮬레이션 보다 크지만 이론에서 제시한 임계 런아웃의 영향을 받고 있다.

날당 이송이 0.1 mm/tooth일 때 측정 평균 거칠기를 적색 실선으로 표시하였다. 실험의 런아웃이 최대 임계값 1.0 μm 에 가까워질수록 평균 거칠기에 미치는 영향이 작아지고, 최대 임계값을 초과하면 더 이상 표면 거칠기에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이론에서 설명했듯이 런아웃은 두 날의 가공 깊이 차이를 만들어 표면 거칠기를 증가시킨다. 그런데 최대 임계 런아웃을 초과하면 한 날만 가공 표면을 만들기 때문에 더 이상 런아웃이 표면 거칠기를 증가시킬 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서 제안된 최대 임계 런아웃 식과 스펴들 홀더 공구 시스템의 측정 런아웃을 비교해

런아웃을 줄여 표면을 개선할 수 있는지 없는지 판단할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 런아웃이 표면 거칠기와 요철의 간격에 미치는 영역을 구분하는 임계값을 이론적으로 유도하고 시뮬레이션과 가공실험으로 검증했다. 기하학적 시뮬레이션 및 참고문헌의 알루미늄 가공 프로파일은 이론과 동일했고, 탄소강 가공 표면은 이론보다 거칠고 임계 런아웃 영향을 받았다.

런아웃이 평균 임계값 미만이면 윤곽이 중심선과 두 점에서 교차해 요철의 평균 간격이 날당 이송과 같아지고, 초과하면 한 점에서만 교차해 요철의 평균 간격이 날당 이송의 두 배와 같아진다. 런아웃이 두 날의 절삭 깊이 차이를 만들어 표면 거칠기를 증가시키지만 평균 임계값을 지나면 런아웃이 평균 거칠기에 미치는 영향이 점점 작아진다. 최대 임계값을 초과하면 한 날만 표면 생성에 참여하기 때문에 더 이상 런아웃이 표면 거칠기에 영향을 미치지 않는다.

후기

이 연구는 2017년도 산업핵심기술개발사업(과제번호 1004855)의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Ehmann, K. F., Hong, M. S., 1994, A Generalized Model of the Surface Generation Process in Metal Cutting, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 43:1 483-486, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62258-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62258-6).
- [2] Rivière-Lorphèvre, E., Filippi, E., 2009, Mechanistic Cutting Force Model Parameters Evaluation in Milling Taking Cutter Radial Runout into Account, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45 8-15, <https://doi.org/10.1007/s00170-009-1943-9>.
- [3] Yang, Y., Zhang, W. H., Wan, M., 2011, Effect of Cutter Runout on Process Geometry and Forces in Peripheral Milling of Curved Surfaces With Variable Curvature, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51:5 420-427, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.01.005>.
- [4] Cho, H. G., Kim, J. D., Yoon, M. C., 2011, Cutting Force Modelling in End-milling Considering Runout, *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 20:3 225-231.
- [5] Baek, D. K., Ko, T. J., Kim, H. S., 2001, Optimization of Feedrate in a Face Milling Operation Using a Surface Roughness Model, *International journal of machine tools and manufacture*, 41:3 451-462, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00039-0).
- [6] Franco, P., Estrems, M., Faura, F., 2004, Influence of Radial and Axial Runouts on Surface Roughness in Face Milling with Round Insert Cutting Tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44:15 1555-1565, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2004.06.007>.
- [7] Schmitz, T. L., Couey, J., Marsh, E., Mauntler, N., Hughes, D., 2007, Runout Effects in Milling: Surface Finish, Surface Location Error, and Stability, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47:5 841-851, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.06.014>.
- [8] Kim, B. K., Park, H. B., Lee, D. W., Kim, J. S., Jung, Y. H., 1999, A Study on Evaluation of Machinability using Cutter Runout in Ball-end Milling, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 16:10 35-44.
- [9] Kim, T. M., Je, S. U., Lee, H. S., Chu, C. N., 2006, High Speed Machining Considering Efficient Manual Finishing Part I : Phase Shift and Runout Affecting Surface Integrity, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 23:12 30-37.
- [10] Hwang, Y. K., Lee, C. M., 2006, A Study on the Spindle Run-out Effects on Cutter Mark and Surface Roughness, *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 5 189-194.



Su-Jin Kim
 Professor in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University.
 His research interest is smart manufacturing.
 E-mail: sujinkim@gnu.ac.kr



Dong-Hyun Kim
 Researcher of APCS Technology Center, Gyeongbuk Research Institute of Vehicle Embedded Technology.
 E-mail: dhkim@givet.re.kr