

평 엔드밀 공구인선부 조도의 간접적인 측정법

김전하*, 강명창**, 김정석**

Indirect Method for Measurement of Tool Edge Roughness in Flat End Mill

Jeon-Ha Kim*, Myung-Chang Kang**, Jeong-Suk Kim**

ABSTRACT

End mill is an essential tool to generate complex surface in workpiece and it has been developed with various materials and tool shapes. The most important factor to evaluate the performance of end mill is still the wear characteristics of flank face. In addition to the flank wear, the tool edge roughness generated by the chipping is another important factor in aspects of material property and machinability evaluation and affects the quality of machined surface. Up to now, there is no direct method for measurement of tool edge roughness. In this study, the tool edge roughness of flat end mill is indirectly measured along the axial direction of workpiece. The theoretical equation is derived in consideration of tool geometry. Finally, the optimal conditions to measure the tool edge roughness by the proposed method are presented through the theoretical review and experimental identification.

Key Words : Flat end mill(평 엔드밀), Surface roughness(표면조도), Flank wear(여유면 마멸), Chipping(치핑), Up cutting(상향절삭), Tool edge roughness(공구인선 조도), Indirect measurement(간접측정)

기호설명

- r = Tool radius
- D_r = Radial depth
- F_t = Feed per tooth
- dF_t = Increment of feed per tooth
- θ = Contact angle of tool edge
- $d\theta$ = Increment of contact angle of tool edge
- \emptyset = Flank angle
- W_f = Flank wear
- R_a = Actual surface roughness measured
- R_{ac} = Actual surface roughness by chipping
- R_{ae} = Tool edge roughness

1. 서론

엔드밀 공구는 고속가공에 의한 금형의 생산과 수요가 증가하고, 고정도· 고품위 가공을 위하여 현재 새로운 형상과 소재의 개발로 많은 발전을 해오고 있다. 이러한 요구에 맞추어 고정도 소재를 가공하고, 과도한 치핑을 방지하기 위해 고속도강에서부터 코팅된 초경합금까지, 2 날에서 6 날까지 다양한 소재와 형상으로 개발되어져 왔다⁽¹⁻³⁾. 하지만, 지금까지 엔드밀 공구의 성능평가는 주로 여유면마멸에 국한되어져 왔다.

여유면마멸의 증가는 절삭력의 증가를 가져오고, 과도한 절삭열을 발생시킴으로써 공작물의 표

2002년 2월 27일 접수
 * 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
 ** 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소

면손상 및 부가적인 마멸의 증대를 가져온다^(4,6). 하지만, 이러한 여유면마멸은 공구와 소재 사이의 연마에 의한 정상적인 마멸시험과 같은 특징을 지니며, 실제로는 공구인선부의 치핑으로 인한 거칠기가 공작물 표면뿐만 아니라, 금형가공된 제품의 품질에 악영향을 미치고, 공구소재에 단점이 될 수 있으므로, 공구설계와 개발에 필요한 성능평가 인자로 반드시 측정되어야 할 요소이기도 하다.

볼 엔드밀(Ball end mill)로 가공된 표면은 곡면이고, 날의 부위별 절삭거리가 다르기 때문에 간접적으로 날의 인선부 조도를 측정하기는 곤란하지만, 평 엔드밀의 경우는 이송의 직각 방향으로 날의 흔적이 남게 되므로 공구인선부의 조도 측정이 가능할 수 있다. 대부분 평 엔드밀가공 후에는 이송방향으로 조도를 측정하며, 때때로 측정자들이 가공 후 무심코 축방향으로 조도를 측정해서 조건별 경향을 파악하는 경우가 있다⁽⁷⁾. 이런 경우, 축침(Stylus)의 진행이 축방향과 일치하지 않고, 기울어진 곡면부위를 따라 축침이 진행하면 정확한 측정값을 얻기 힘들다. 주축의 고속화로 인해 이송과 절입을 적게 함으로 인해 측정데이터가 공구인선부의 조도라고 단정하기는 어렵다. 3 차원 스캐닝(Scanning)에 의해 조도와 축방향 측정이 가능하나, 측정시간과 데이터처리에 상당한 시간이 소요되며, 먼저, 측정이 가능한 조건에서 가공된 시편의 준비가 필요할 것이다.

본 연구에서는 평 엔드밀의 공구인선부 조도를 측정하기 위해 가공에 의한 가공물 표면의 축방향 조도를 측정하는 간접적인 방법을 시도하였다. 먼저 상향 및 하향절삭의 메커니즘을 분석하고, 이상적인 공구궤적과 표면구배를 비교하면서 최적의 가공방법과 측정부위를 이론적으로 선정하였다. 마멸된 공구를 사용하여 선정된 조건으로 가공한 공작물의 축방향 표면조도를 측정하고, 이를 공구인선부 형상과 비교·평가하였다. 이러한 이론적인 고찰과 실험적인 검증을 통해 평 엔드밀의 공구인선부 조도 측정을 위한 최적의 조건 및 유용한 방법과 식을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 공구인선 정밀도의 중요성

가공물의 표면으로부터 간접적으로 공구인선부의 조도를 측정하기 위해서는 어떤 가공을 행하

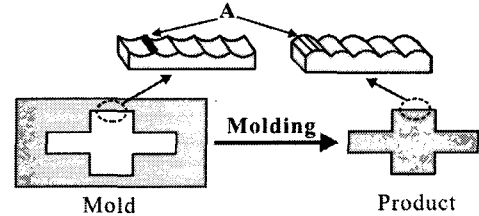


Fig. 1 Accuracy comparison of mold and product

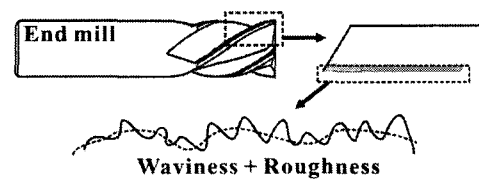


Fig. 2 Roughness generation of tool edge

며, 어떤 조건에서 가공을 해야 하는 지를 결정해야 한다. 먼저, 이러한 공구인선부의 측정이 필요한 이유는 Fig. 1로부터 알 수 있다. 실제 금형의 경우 표면은 A 부위가 주관심 대상이며, 금형가공되어진 완제품의 경우에는 공구인선부의 정밀도에 의해 생성된 A 부위가 다른 물체와 접촉을 하게 되므로 이 부분의 고정도 가공이 요구된다.

공구마멸은 피삭재의 소재와 공구의 소재, 형상 특성에 따라 각각 다른 마멸거동을 보이며, 엔드밀 공구는 여유면마멸, 경사면(Rake face)마멸, 치핑과 같은 손상을 받게 된다. 엔드밀 공구의 경우는 지금까지 대부분 여유면마멸의 상대적인 비교를 통해 성능이 평가되고 있기 때문에, 과도한 치핑이나 공구인선부의 이상 마멸에 대한 연구는 미진한 상태이다. 공구 소재의 발달과 함께 치핑이 발생하지 않고, 균일하게 연마에 의한 마멸이 진행되는 공구의 개발과 성능평가를 위해서는 Fig. 2 와 같이 나타나는 공구인선부의 조도를 정량적으로 측정하여 분석하는 것이 필요할 것이다.

2.2 상향 및 하향절삭 메커니즘

밀링가공법은 크게 상향 및 하향절삭 두 가지로 구분된다. 일반적으로 상향절삭은 공구의 이송과 칩의 배출이 동일한 가공형태이며, 하향절삭은 반대로 공구의 이송과 칩의 배출이 반대인 가공형태를 말한다. 공구인선부의 조도를 측정하기에 좋은 가공법이 어떤 가공인지를 선정하기 위해 Fig. 3 에 엔드밀에 대한 두 가공형태와 이송에 따른

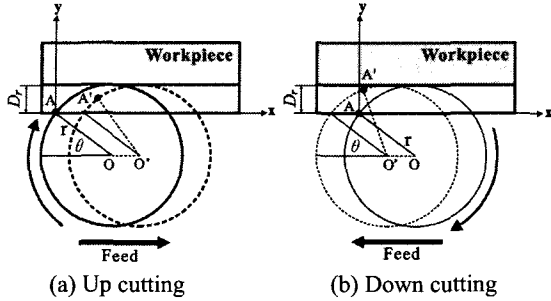


Fig. 3 Mechanisms of up and down cutting

공구날의 궤적을 구하기 위한 기하학적인 형상을 나타내었다.

공구치침으로 인한 가공정밀도의 저하에 관한 연구가 Surtherland 와 Devor⁽⁸⁾ 에 의해 이루어져 일반적인 공구와 공작물에 유연성을 부여한 유연성 모델(Flexible model)이 개발되었다. 본 연구에서는 엔드밀 가공시 상향과 하향절삭에 따른 이상적인 표면구배의 비교를 제시하기 위하여 아래와 같이 공구의 기하학적인 형상만을 고려하였으며 공구의 궤적을 구하는 식을 구하면 아래와 같다.

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{r - D_r}{r} \right] \rightarrow d\theta = \pi \cdot \frac{dF_t}{F_t} \dots\dots\dots(1)$$

상향절삭의 경우

$$\begin{aligned} x &= (r \cdot \cos\theta + N \cdot dF_t) - r \cdot \cos(\theta + N \cdot d\theta) \\ y &= r \cdot \sin(\theta + N \cdot d\theta) - (r - D_r) \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

하향절삭의 경우

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos\theta - N \cdot dF_t - r \cdot \cos(\theta + N \cdot d\theta) \\ y &= r \cdot \sin(\theta + N \cdot d\theta) - (r - D_r) \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

여기서, N=정수(0, 1, 2, ..., 499)

위 식들로부터 구해진 1 날의 구배를 날당 이송량 만큼 더해가면 표면구배가 생성되게 된다.

2.3 최적 측정조건 선정

시각적으로 확인하면서 축침식 표면조도계의 축침의 위치를 지정하기 위하여 가공면의 커스프(Cusp)가 크게 되도록 날당이송을 선정해야 한다.

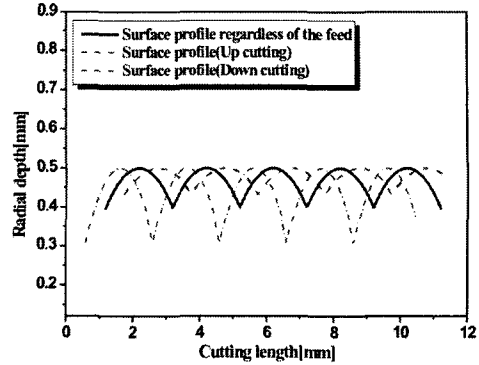


Fig. 4 Surface profiles for up and down cutting

따라서, 날당이송을 2mm 로 정하고, 반경절입은 여유면의 크기를 충분히 고려하여 0.5mm 로 하였으며, 사용된 공구의 직경은 10mm 로 하였다.

이러한 조건의 수치를 식 (2), (3)에 적용하여 프로그램을 통해 공구의 궤적을 계산한 후 궤적이 생성한 표면구배의 시뮬레이션 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 4 의 결과는 가공시 공구의 동적 또는 진동의 영향을 무시한 아주 이상적인 상태의 공구날의 궤적이 생성한 표면구배이며, 이송이 고려되지 않은 상태와 비교해서 나타내었다. 상향과 하향절삭의 차이를 알 수 있으며, 특히, 하향절삭시 표면조도가 나쁘고, 축방향 조도측정시 급격한 경사로 인해 측정이 난해할 것을 예상할 수 있다.

이러한 이상적인 가공시의 공구 2 회전 표면구배에 대해 앞서 선정한 조건에서 계산한 표면조도를 비교해 보면 상향절삭시 표면이 하향절삭에 비해 3 배 이상 우수함을 알 수 있다. 일반적으로 상향절삭은 하향절삭에 비해 공작물과의 접촉길이가 길고, 진동이 많이 발생하며, 절삭부하가 크게 걸리기 때문에 공구마멸 측면으로 볼 때는 잘 사용하지 않는 가공법이지만, 표면조도가 좋은 장점이 있다. 이상의 결과를 토대로 최종적인 가공법과 측정부위 선정은 Fig. 5로부터 설명된다.

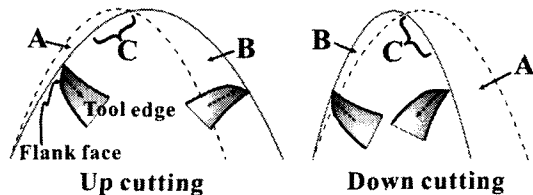


Fig. 5 Selection of measuring region

A 부위는 날의 이송과 회전에 의해 여유면이 진행과 반대방향에 위치하게 되므로, 여유면에 의한 앞선 가공부위의 마찰이 일어나지 않지만, B 부위는 여유면이 진행과 동일 방향에 위치하므로 여유면이 날의 진행과 함께 간섭을 받게 되므로, 이 영역에서 주로 여유면 마멸이 진행될 것으로 사료된다. 따라서, 경사가 완만하고 마찰이 발생하지 않는 C 부위가 측정에 유리할 것으로 예상되며, 완만한 경사를 이루는 상향절삭을 가공법으로 선정하였다. 또한, 최적의 절입과 이송은 조건별 실험결과로부터 선정되었다.

2.4 실험방법 및 가공조건

공구인선부의 조도를 결정하는 치핑들의 크기는 아주 불규칙(Random)하게 나타날 것이다. 따라서, 본 연구에서 치핑은 여유면과 경사면으로 동일한 길이로 발생한다고 가정한다. 2 날 평 엔드밀의 한쪽 날에 날카로운 초경소재를 사용하여 여유면과 경사면에 동일한 길이로 찌힘을 주어 인위적인 치핑(0.15~0.2mm)을 과도하게 주었다. 나머지 날은 원래 상태로 둬으로써 표면조도 측정시 시각적인 확인이 가능하도록 하였으며, 이렇게 제작한 공구를 Fig. 6 에 나타내었다. 조건별 표면조도의 원활한 측정을 위하여 Fig. 7 과 같이 톱니바퀴 형태의 시편을 제작하여 실험하였다.

가공후 공구인선부 형상은 가공기의 테이블에 부착된 50 배 렌즈가 달린 CCD 통해 획득하였고,

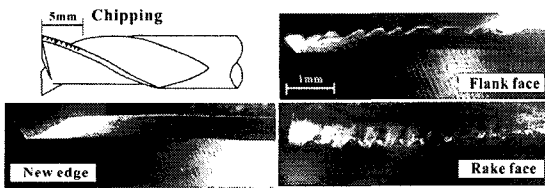


Fig. 6 Tool shape

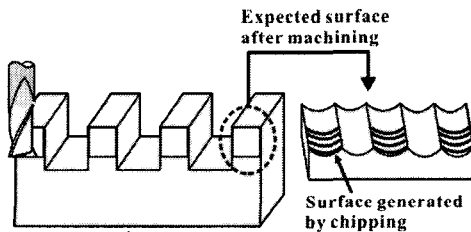


Fig. 7 Workpiece for surface roughness

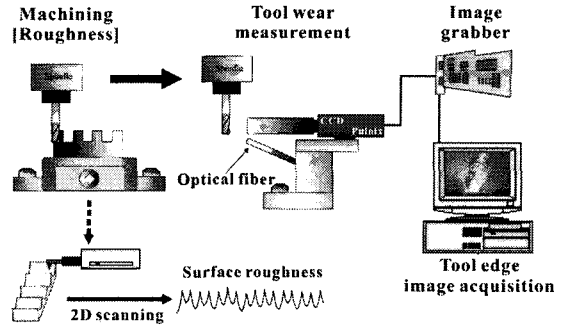


Fig. 8 Experimental setup

Table 1 Specification of instrument

Instrument	Specification
Machining center	Makino V-55 Max rpm= ~20,000rpm
Surface tester	Surftester-2D(Mitutoyo)
Tool	HSS, 2 flute flat end mill, 10 ϕ
Workpiece	Al alloy

Table 2 Cutting conditions

Spindle speed[rpm]	1000
Radial depth[mm]	0.1, 0.5
Feed per tooth[mm/tooth]	0.25, 0.5, 1, 2
Axial depth[mm]	10

이미지그래버(Image grabber)를 거쳐 PC 에 저장된다. 그리고, 축침식 표면조도계를 사용하여 측방향의 표면조도를 측정하여, 표면구배와 획득된 인선부의 형상구배를 비교하였다. 이러한 방법으로 실험하기 위한 전체적인 실험장치도를 Fig. 8, 장비사양을 Table 1, 가공조건을 Table 2 에 나타내었다.

본 실험의 표면조도시편에 대한 가공조건은 실제로는 사용되지 않는 상당히 가혹한 조건이지만, 앞서 설명한 것처럼 실험을 위해 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 날부 형상과 표면구배의 유사성

조도시편에 대해 가공을 행한 후, 조도를 측정하고, 표면구배를 출력하여 CCD 로 촬영한 날부의 형상과 비교하였다. 인선부 치핑의 끝부분이 표면

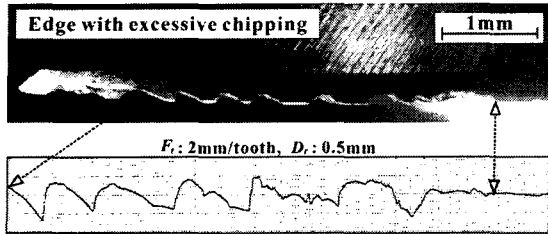


Fig. 9 Edge shape and surface profile

구배의 산부분과 일치하므로 형상을 상하로 뒤집어 비교가 용이하도록 하였다. Fig. 9에서 처럼, 인위적 치핑을 가한 부위와 동일한 위치에서 구배 특성들이 나타나므로 공구인선의 치핑 특성이 날당이송 2mm/tooth, 반경절입 0.5mm의 실험조건에서 가공물의 표면에 잘 나타남을 알 수 있다.

3.2 최적 측정조건 선정

하향절삭의 경우 Table 2의 실험조건에서 날당이송 2mm/tooth, 반경절입 0.1mm의 경우에는 가공이 거의 되지 않으며, 표면조도가 아주 나빠진다. 따라서, 표면정밀도 측면에서 비교하여 적절한 가공방법을 상향절삭으로 선정하였다. 상향절삭시 날당이송 2mm/tooth, 1mm/tooth, 반경절입 0.5mm의 조건으로 Fig. 5에서 언급한 것처럼 최적의 측정위치를 선정하기 위하여 인선방향으로 세 위치에서 측정된 표면조도를 Fig. 10에 나타내었으며, 이론적인 결과와 같이 절삭의 중반 이후로는 이송에 의해 여유면이 표면과의 마찰로 앞서 생긴 조도를 낮추는 작용을 하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11에 나타난 표면구배의 변화를 보면, 한 날에 의한 절삭이 중반을 넘어설수록 치핑으로 생긴 돌기

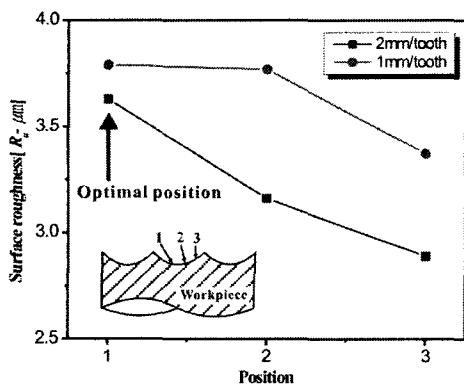


Fig. 10 Surface roughness according to positions

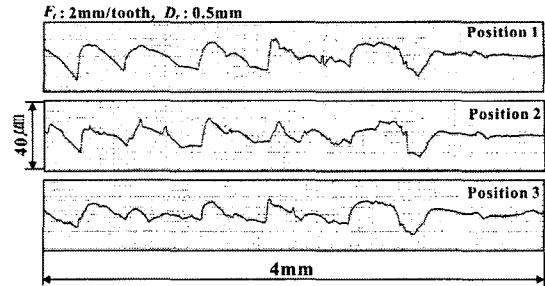


Fig. 11 Surface profile according to positions

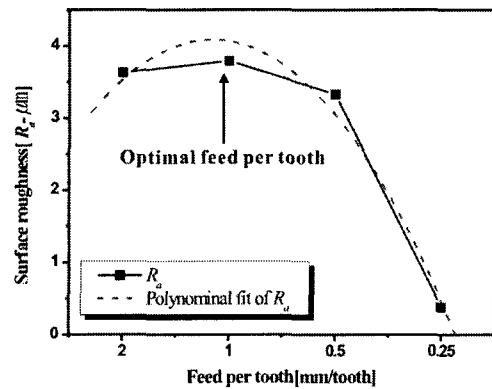


Fig. 12 Surface roughness according to the feed

와 같은 구배들이 완만하게 깎여져 나감을 잘 나타내고 있으며, 이는 하향절삭과는 반대로 상향절삭시에는 한 날의 가공후반부에서 이송하는 공구의 여유면이 공작물을 누르면서 마찰을 하기 때문이다. 따라서, 공구인선부 조도의 측정위치로는 위치 1(Fig. 5에서의 C부분)이 최적으로 선정되었다.

최적의 날당이송을 선정하기 위하여 이송을 4단계로 변화시키면서 실험하고, Fig. 12와 같이 표면조도를 측정하였다. 날당이송이 2mm/tooth, 1mm/tooth 일 때는 시각적으로 확인하면서 위치 1에서 측정이 가능하였으나, 0.5mm/tooth, 0.25mm/tooth 일 때는 시각적으로 위치를 선정하기가 어려웠다. 날당이송이 1mm/tooth 보다 작은 경우에는 날의 치핑영역 전체가 절삭에 관여하지 않기 때문에 표면조도가 낮아지고, 치핑형상을 잘 나타내지 못하였다. 따라서, 측정의 위치를 시각적으로 확인하면서 위치시킬 수 있고, 표면구배 역시 치핑형상을 잘 나타내는 날당이송 1mm/tooth를 최적의 날당이송으로 선정하였다.

최대 치핑이 여유면마멸 0.3mm 이하로 발생되

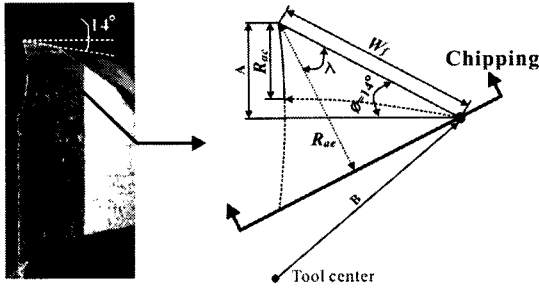


Fig. 13 Flank angle and roughness generated by chipping

고, 앞서 언급한 공구날의 치핑은 여유면과 경사면으로 길이가 동일하게 발생한다고 가정하면, Fig. 13 과 같이 여유각이 존재하기 때문에 표면의 조도는 여유면으로의 치핑길이에 의존하게 된다.

CCD 로 획득한 엔드밀 밀날 형상 이미지로부터 여유각을 측정된 결과 14° 였으며, 여유면 치핑길이에서의 공구반경을 B 로 정의하여 실제 피삭재에 나타나는 조도의 크기(Rac)를 정의하면 식 (6)과 같이 된다. 식 (6)을 다시 변수인 여유면으로의 치핑길이(Wf), 즉, 치핑에 의한 여유면마멸에 대해서 정리하여 조건을 만족하는 이차방정식의 근을 구하여 나온 결과가 식 (7)과 같다. 최종적으로 측정된 표면조도에 의해 구하고자 하는 치핑에 의한 인선 조도(Rac)는 Fig. 13 의 치핑이 이등변삼각형의 형태를 취하므로 꼭지점에서 수직으로 내린 길이이므로 90° 에서 여유각을 뺀 각도를 고려하여 식 (9)와 같이 나오게 된다.

$$A = W_f \cdot \sin \phi \dots\dots\dots(4)$$

$$B = \sqrt{(r - A)^2 + (W_f \cdot \cos \phi)^2} \dots\dots\dots(5)$$

$$R_{ac} = r - B = r - \sqrt{(r - A)^2 + (W_f \cdot \cos \phi)^2} \dots\dots\dots(6)$$

$$W_f = r \cdot \sin \phi - \sqrt{r^2 \cdot \sin^2 \phi - R_{ac}(2r - R_{ac})} \dots\dots\dots(7)$$

$$\lambda = (90^\circ - \phi) / 2 \dots\dots\dots(8)$$

$$R_{ac} = \cos \lambda \cdot [r \cdot \sin \phi - \sqrt{r^2 \cdot \sin^2 \phi - R_{ac}(2r - R_{ac})}] \dots\dots\dots(9)$$

식 (6)을 이용하여 최대 여유면마멸 0.3mm 를 대입하여 풀면 실제 치핑에 의해 생기는 최대 조

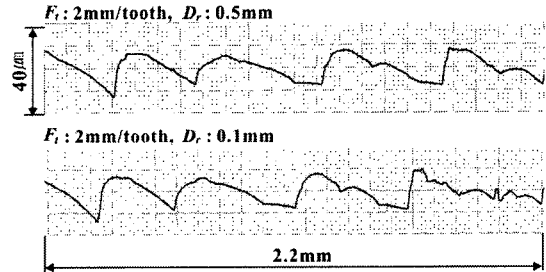


Fig. 14 Surface profile by radial depths

도값은 64 μm이다. 따라서, 반경절입을 0.5mm 정도로 과도하게 선정할 필요가 없으므로 반경절입을 0.1mm(100 μm)로 하여 실험한 결과, 표면조도와 구배 모두 거의 유사한 값과 경향을 나타내었다. 4 개 치핑부위의 표면구배에 대해 반경절입 0.5mm 일 때와 비교한 것을 Fig. 14 에 나타내었다. 따라서, 최적의 반경절입을 0.1mm 로 선정하였다.

3.3 공구인선 조도의 보정

측정된 표면조도값과 마멸공구의 기하학적인 형상에 의해 공작물에 생기는 이론적인 조도값을 비교하여 보정계수를 파악하고, 이를 최종적인 식에 적용하기 위해 Fig. 15 와 같이 실제 측정된 표면조도에서 4 개의 피크(Peak)높이, 형상으로부터 동일한 피크들에 대해 측정된 여유면 치핑길이 (Peak1=0.19mm, Peak2=0.17mm, Peak3=0.165mm, Peak4=0.18mm)를 식 (6)에 대입하여 시뮬레이션으로 얻어진 높이, 측정된 조도 피크부위의 완만한 구배를 날카롭게 보정한 피크높이를 비교하였다.

Fig. 16 에서처럼 측정된 피크높이 평균은 시뮬레이션한 높이에 비해 2.25 배 낮고, 보정한 피크높이는 1.52 배 낮게 나온다. 이는 치핑의 날카

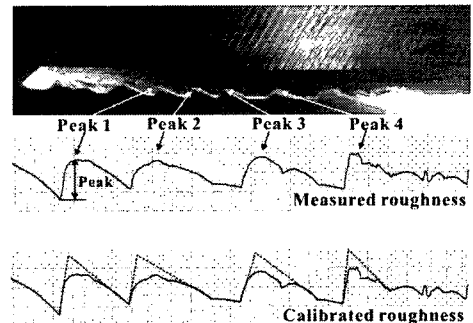


Fig. 15 Measured and calibrated peaks

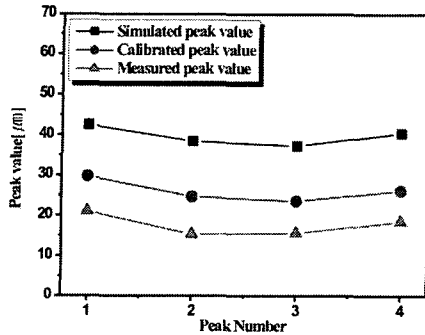


Fig. 16 Roughness values generated by each peaks

로운 골부분이 공작물의 인성으로 인해 무너지고, 또한, 측정기, 진동, 열적특성으로 인한 오차로 사료되며, 이러한 오차성분을 정수 K 로 정의한다. 따라서, 치핑에 의한 표면조도(R_{ac})는 식 (10)과 같이 표현되며, 최종적인 치핑에 의한 인선부 조도(R_{ae})는 식 (9)에 식 (10)을 대입함으로써 식 (11)과 같이 구해지게 된다.

$$R_{ac} = K \cdot R_u = 2.25 \cdot R_u \quad (10)$$

$$R_{ae} = \cos \lambda \cdot [r \cdot \sin \phi - \sqrt{r^2 \cdot \sin^2 \phi - 2.25 \cdot R_u \cdot (2r - 2.25 \cdot R_u)}] \quad (11)$$

4. 결론

본 연구에서는 평 엔드밀의 마멸시 공구인선부의 조도를 간접적으로 측정하기 위한 연구를 수행하였으며, 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 피삭재의 축방향(인선방향) 표면조도 측정을 통한 간접적인 공구인선 조도 측정방법을 이론과 실험으로 제시하였다.
- 2) 인선방향 측정위치별 표면조도 경향으로 부터 상향가공시 한 날의 가공 후반부에 여유면이 피삭재와 간섭을 하며, 인선부의 조도는 이송이 작아질수록 나타나지 않음이 규명되었다.
- 3) 공구인선 조도의 간접적인 측정을 위한 가공법과 가공조건은 상향절삭, 반경절입 0.1mm, 날당이송 1mm/tooth 가 최적으로 선정되었다.
- 4) 치핑에 의한 이론적인 공구인선부 조도식이 유도되었고, 측정 조도값의 보정치를 대입하여 인

선부 조도를 간접적으로 측정할 수 있게 되었다.

이상의 결과를 통해 지금까지 직접적으로 측정할 수 없었던 공구인선부의 조도를 간접적으로 측정하여 파악함으로써 공구개발과 가공성 평가시 좋은 자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)와 부분적으로 국가지정연구실(NRL)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. H. Iwabe, and Y. Fujii, "Study on Cutting Mechanism of Different Helix Angles End Mills," JSPE, Vol. 10, pp. 1889-1893, 1990.
2. H. Schut, "High Speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology," CIRP, Vol. 44, 1995.
3. S. L. Ko, S. K. Lee, and S. M. Bae, "Study on the Design of End Mill Geometry," KSPE, Vol. 18, No. 8, pp. 24-31, 2001.
4. D. Yan, T. I. El-wardancy, and M. A. Elbestawi, "A Multisensor Strategy for Tool Failure Detection in Milling," MTM, Vol. 35, No. 3, pp. 383 - 398, 1995.
5. J. T. Roth, and S. M. Pandit, "Early Prediction of Impending End Milling Tool Failure using Acceleration Signals," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 26, pp. 243-248, 1998.
6. 김정석, 이득우, 강명창, 이기용, 김정훈, "고속가공에서 가공성 평가를 위한 3 축 공구동력계 개발," 한국 정밀공학회지, 제 16 권, 제 5 호, pp. 11-18, 1999.
7. 김정석, 이득우, 강명창, 이기용, 하건호, "고속 엔드밀 가공시 동적모델에 의한 표면형상 예측," 대한기계학회지, 제 24 권, 제 7 호, pp. 1681-1688, 2000.
8. J. W. Sutherland and Devor R. E., "An Improved Method for Cutting Force and Surface Prediction in Flexible End Milling Systems," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, pp. 269-279, 1986.