

고경도 금형강의 고속가공시 소직경 볼엔드밀의 마모에 대한 실험적 연구

양진석[#], 허영무¹, 정태성²

An Experimental Study on Tool Wear of Small Diameter Endmill for High Speed Milling of Hardened Mold Steel

J. S. Yang, Y. M. Heo, T. S. Jung

Abstract

High speed milling experiment on the hardened mold steel (CALMAX at hardness of HRC 55) is carried out using small diameter ball endmill. Tool life and wear characteristics under the various machining parameters are investigated. Effect of dynamic runout on the wear of the tool is also studied. For most of the cases, catastrophic chipping of tool edge is not observed and uniformly distributed wear on the flank surface of the tool is obtained. It is found that lower rate of tool wear is obtained as the cutting speed is increased. Also, high pick feed rate is found to be more favorable in terms of tool wear and material removal rate.

Key Words : High speed milling, Hard Milling, Cutting Force, Tool Wear, Runout, Injection Mold

1. 서 론

근래들어 금형의 수명 증대와 강도 향상을 목적으로 금형 제작시 열처리한 금형강을 많이 사용하고 있으며 고속가공기의 적용사례가 증가하면서 깊은 홈이나 리브(Rib)등 종래에 방전으로 가공하던 부위도 점차 하드밀링(Hard milling)으로 대체하여 금형의 품질과 가공시간을 줄이고자 하는 노력이 진행되고 있다. 하드밀링은 가끔 고속 밀링가공과 혼용되기도 하지만 피삭재가 부드러운 상태에서 가공하는 것이 아니라 열처리된 강을 황삭부터 정삭까지 수행하는 것을 의미한다.

하드밀링은 증가된 이송속도와 pick feed 량 감소로 인하여 가공시간의 증가 없이 금형의 최종 형상을 얻을 수 있는 가능성을 제공하고 이로 인하여 수작업 또는 기계에 의한 마무리 작업을 최소화하거나 없앨 수 있다. 또한 가공시 열 방출이

잘 되므로 금형표면의 결함을 최소화하여 금형수명을 연장시킬 수 있다.

종래에 방전가공으로 하던 깊은 홈이나 리브가공을 하드밀링으로 대체할 경우 소직경 공구로 가공해야 할 부위가 많이 생기게 된다. 소직경 공구는 강성이 작기 때문에 절삭시 절입량을 크게 할 수 없고 특히 날 길이가 긴 공구를 사용할 경우 절입량의 크기나 변동이 공구의 휨이나 공구파손에 큰 영향을 미치므로 가공조건 선정에 주의해야 한다. HRC 50 ~ 60 정도의 고경도 금형강의 고속가공에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으나^{1,2,3} 실제 금형가공시 하드밀링의 적용사례는 아직 많지 않으며 금형제조사에서 보유하고 있는 고속가공기를 고능률로 사용하기 위한 가공조건은 자체적으로 시험하여 확립할 수 밖에 없다. 특히 금형의 형상부 고속가공에 주로 쓰이는 $\phi 5 \sim 6\text{mm}$ 볼엔드밀 및 리브(rib) 가공용의 $\phi 2\text{mm}$ 이하 소직경 볼엔드밀의 경우 발표된 고속가공 절삭실험 데이터가 많지 않다. 본 실험은 플라스틱 사출금형 제작에 많이 적용되는 CALMAX 금

교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀, E-mail:

jsyang@kitech.re.kr

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀

2. 재영솔루션(주) 플라스틱응용기술 연구소

형상을 대상으로 불엔드밀의 고성능 가공을 위한 가공조건을 파악하기 위한 연구의 일환으로 수행되었으며 $\phi 2\text{mm}$ 이하 소직경 불엔드밀의 고경도 소재 가공시 공구마모에 관련된 부분을 중심으로 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

공구 마모시험은 그림 1 에서와 같이 가공기 테이블 위에 별도로 장착된 마모시험용 시편을 일정한 거리만큼 가공한 후 공구동력계 상부에 장착된 절삭력측정 시편을 가공하면서 절삭력을 측정된 후 카메라로 공구마모 부위의 화상을 취득하여 마모량을 측정하며 이 과정을 공구의 마모 한계에 도달할 때 까지 반복한다. 실험에 사용된 장치의 구성 및 사양은 표 1 과 같고 사용한 공구는 TiAlN 코팅된 $\phi 2\text{mm}$, $\phi 1\text{mm}$ 초경 불엔드밀이다.

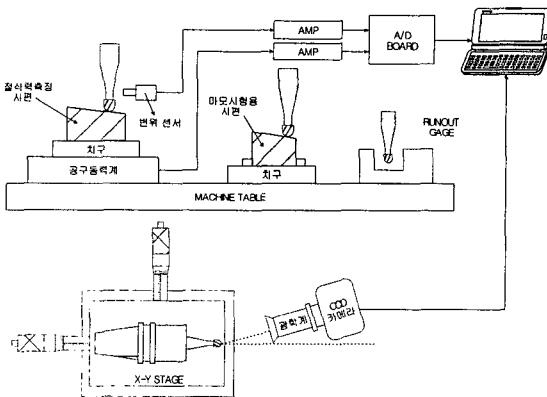


Fig. 1 Diagram of cutting force and tool wear experiment system

Table 1 Specification of experimental equipments

고속가공기	Röders RFM760, 4200RPM
공구동력계	Kistler 9256B1
Gap Sensor	AEC-5502A
Charge Amp	Kistler 5019
CCD camera	10X Zoom, 6X Macro, 4M pixel
A/D Board	NI PCI-MIO-16E-4
Runout Gage	Optech EDR S/D10
밀링방식	Down milling
공구돌출길이	27mm

공구의 마모는 절삭조건 외에 공구 및 피삭재의 특성 즉, 재질, 경도, 공구형상, 냉각방법 등에 따라 달라지며 기계적 마모와 열화학적 마모에 의한 것으로 대별할 수 있고 플랭크 마모, 크레이터 마모, 치핑 등의 형태로 나타난다. 정상적인 마모조건 하에서 마모량을 판단하는 기준으로 하지만 가공면의 조도 증가, 치핑의 크기를 동시에 고려해야 한다. 공구의 마모폭이 적더라도 일정크기 이상의 치핑이 발생하거나 표면조도가 일정한계를 넘어서면 마모한계에 도달한 것으로 판단한다.

2.2 실험결과 및 고찰

아래의 표 2 는 본 실험에 사용한 공구 제조사에서 제시한 절삭조건이다. $\phi 2\text{mm}$ 이하의 소경 엔드밀의 경우에는 황삭과 정삭의 구분없이 축방향 절입량과 pick feed 의 최대치는 $\phi 3\text{mm}$ 엔드밀과 동일한 비율이지만 절삭속도는 370m/min 으로 상당히 높고 통상의 축방향 절입량 $ap=0.2\text{mm}$ 를 감안하면 10 만 RPM 이상의 주축회전수가 필요하다.

이를 기준으로 고속가공에 적합한 절삭속도 및 절입량의 영향을 판단하기 위한 시험조건을 선정하였다. 사용한 공구동력계가 250Newton 까지 측정할 수 있는 소형이고 공구에 걸리는 과도한 절삭력을 피하기 위하여 축방향 절입량은 최대치의 50%로, 날당 이송량은 추천값으로 고정하였고 절삭속도와 pick feed 를 변경시켜가면서 실험하였다. 유사한 경도의 금형강을 대상으로 한 $\phi 3\text{mm}$, $\phi 6\text{mm}$ 엔드밀의 가공실험 결과⁴ 를 보면 그림 2 에서와 같이 절삭속도가 추천값에 근접할수록 절삭력이 작아지고 공구의 마모특성이 좋아지는 결과를 얻었으므로 본 실험에서 절삭속도 변화 범위는 추천값보다 아주 적거나 큰 값을 제외하여 실험 횟수를 줄였다.

또한, $\phi 2\text{mm}$ 이하 소경공구의 절삭시험에서는 공구의 빈번한 진입/진출에 의한 공구부하의 급격한 변화에 의해 치핑이 발생하는 영향을 줄이기 위해 경사면이 아닌 평면을 Z-level 가공하는 것으로 공구경로를 변경하여 실험하였다.

2.2.1 $\phi 2\text{mm}$ 불엔드밀의 마모시험

본 실험에 사용한 고속가공기는 최대 주축회전수가 42,000RPM 이기 때문에 $\phi 2\text{mm}$ 불엔드밀 가

Table 2 Tool maker's suggested cutting conditions for ball endmills (Hardened steel > 48-56 HRC)

	가공 조건		
	d > φ3mm		d < φ2mm
	황삭	정삭	
절삭속도 Vc (m/min)	200	280	370
축방향절입량 ap (mm)	0.1d	0.02d	0.096d
반경방향절입량 ae (mm)	0.3d	0.01d	0.3d
날당이송 fz (mm/날)	0.100	0.051	0.03d

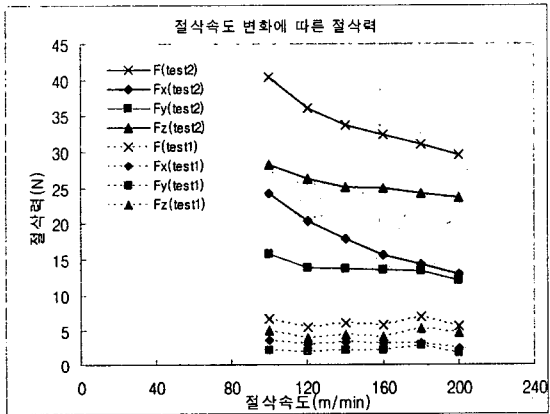


Fig. 2 Measured Cutting forces for Φ3mm ball endmill according to the variation of cutting speed (STAVAX, Test2: ap=0.15, ae=0.08, fz=0.04, Test1: ap=0.06, ae=0.03, fz=0.012)

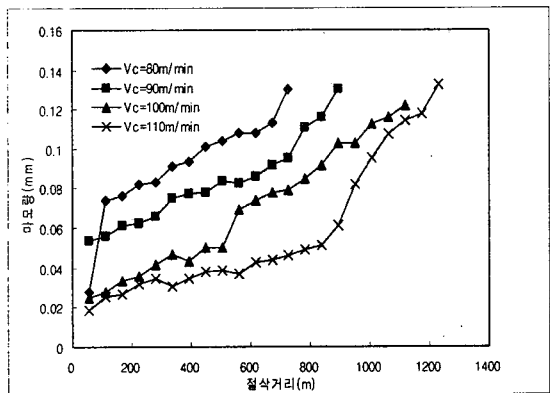


Fig. 3 Measured flank wear of Φ2mm ball endmill according to the variation of the cutting speed (CALMAX, ap=0.1, ae=0.2, fz=0.06)

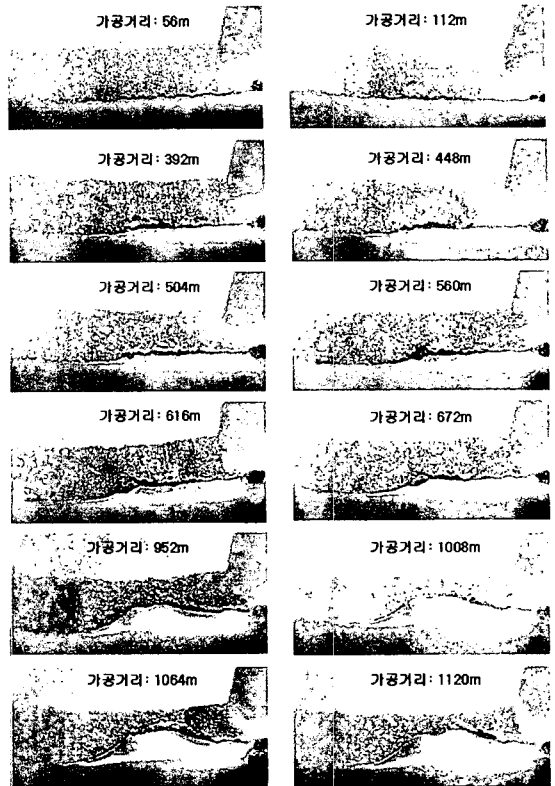


Fig. 4 Photographs showing progressive wear of flank surface for Vc=80m/min (ap=0.1, ae=0.2, fz=0.06)

공시 축방향 절입량 ap=0.1mm 로 얻을 수 있는 절삭속도는 약 110m/min 이 한계로서 추천 절삭속도인 370m/min 의 1/3 미만의 낮은 속도에서 가공이 이루어진다.

그림 3 은 절삭속도를 80 ~ 110m/min 으로 변화시켰을 때의 마모량 측정결과이다. φ3mm(경사면 및 일방향 직선가공) 엔드밀의 가공시험 결과에서는 주로 인선부 치핑에 의해 공구수명이 결정되었으나 φ2mm 의 경우 평면을 spiral 가공경로로 가공한 결과 그림에서 보듯이 실험한 속도영역에서 모두 이상마모나 치핑이 생기지 않고 안정적인 마모형태를 보였고 절삭속도가 증가함에 따라 공구수명이 길어지는 결과를 얻었다. 따라서 사용 가공기의 주축속도가 추천 절삭속도에 이르지 못할 경우 기계가 허용하는 최대 RPM 에서 가공해야 공구수명도 증가시킬 수 있고 feed 속도도 높일 수 있다.

그림 4 는 Vc = 100m/min 로 가공했을 때 플랜

크면의 마모가 진행되는 것을 보여주는 사진으로서 이상마모 없이 피삭재와의 접촉부 전면적으로 비교적 균일한 마모가 진행된 것을 알 수 있다.

그림 5(a) 및 5(b)는 공구 마모율이 가장 적은 $V_c=110\text{m/min}$ 에서 pick feed 를 0.1~0.4mm 로 변화시켜서 실험한 결과이다. 그림 5(a)에서와 같이 절삭거리 기준의 마모량 그래프를 보면 $a_e=0.2\text{mm}$ 이외의 조건에서는 절삭거리에 큰 차이가 없으나 마모증가율은 $a_e=0.2\text{mm}$ 경우에 비해 상대적으로 크게 나타났으며 $a_e=0.2>0.1>0.4>0.3\text{mm}$ 의 순서로 절삭거리가 길었다.

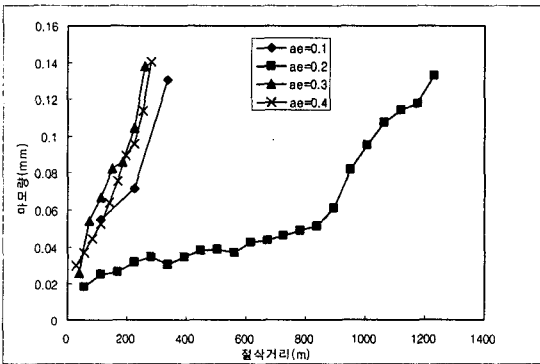


Fig. 5(a) Measured flank wear of 2mm ball endmill according to the variation of pick feed (CALMAX, $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0.1$, $f_z=0.06$)

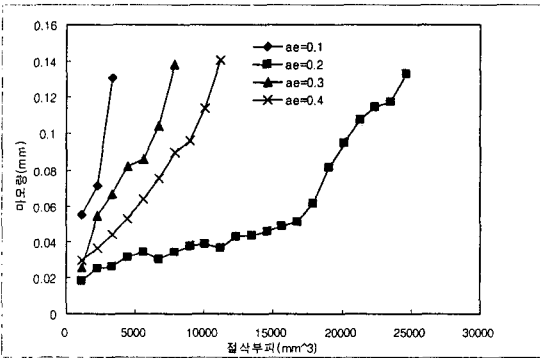


Fig. 5(b) Measured flank wear of 2mm ball endmill according to the variation of pick feed (CALMAX, $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0.1$, $f_z=0.06$)

실제 황·중삭 가공시에는 절삭거리나 표면조도 측면보다는 공구에 이상마모가 생기지 않는 한도 내에서 단위시간에 많은 체적을 제거하여 MRR (Material Removal Rate)을 높이는 것이 더 중요한 성능지표이다. 그림 5(b)에서와 같이 절삭부피 기

준으로 보면 $a_e=0.2>0.4>0.3>0.1$ 로서 pick feed 를 작게 하는 것 보다는 크게 가공하는 것이 공구마 모측면과 가공능률 측면에서 유리함을 알 수 있다. $a_e=0.1\text{mm}$ 와 $a_e=0.4\text{mm}$ 경우를 비교해보면 $a_e=0.4\text{mm}$ 로 가공할 경우가 $a_e=0.1\text{mm}$ 로 가공할 때 보다 절삭부피로는 약 3 배, 가공시간은 1/4 로서 약 12 배 정도 가공능률이 차이가 나게 되므로 허용한도 내에서 pick feed 를 가능한 크게 하는 것이 절대적으로 유리함을 알 수 있다. 그림 6, 7 은 각각 $a_e=0.1$, 0.4mm 일 경우 절삭거리에 따른 플랭 크면의 마모진행을 보여주는 사진이다.

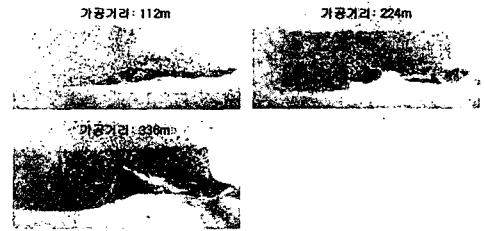


Fig. 6 Photographs showing progressive wear of flank surface for $a_e=0.1\text{mm}$ ($a_p=0.1$, $f_z=0.06$, $V_c=110\text{m/min}$)

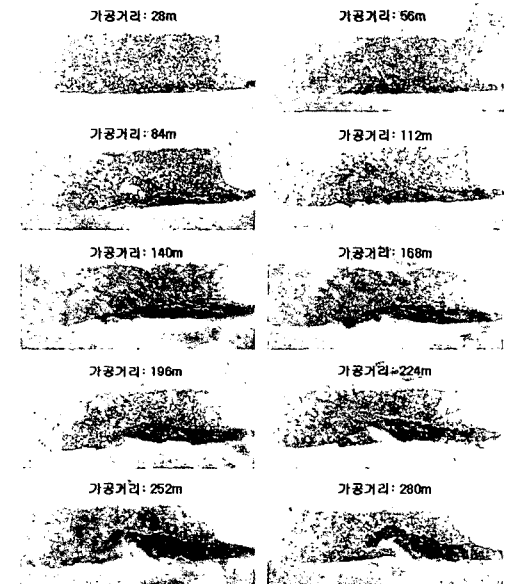


Fig. 7 Photographs showing progressive wear of flank surface for $a_e=0.4\text{mm}$ ($a_p=0.1$, $f_z=0.06$, $V_c=110\text{m/min}$)

2.2.2 $\phi 1\text{mm}$ 볼엔드밀의 마모시험 $\phi 1\text{mm}$ 볼엔드밀 가공시 축방향 절입량 $a_p=0.05\text{mm}$

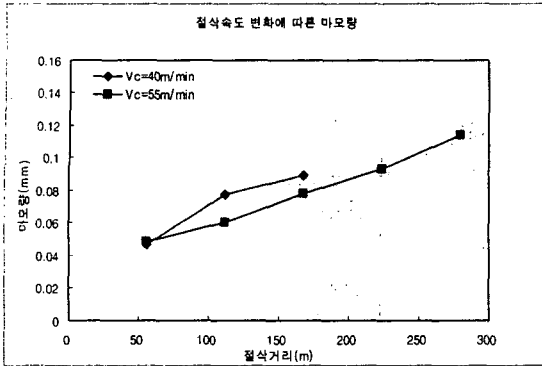


Fig. 8 Measured flank wear of $\phi 1\text{mm}$ ball endmill according to the variation of cutting speed (CALMAX, $a_p=0.05$, $a_e=0.1$, $f_z=0.03$)

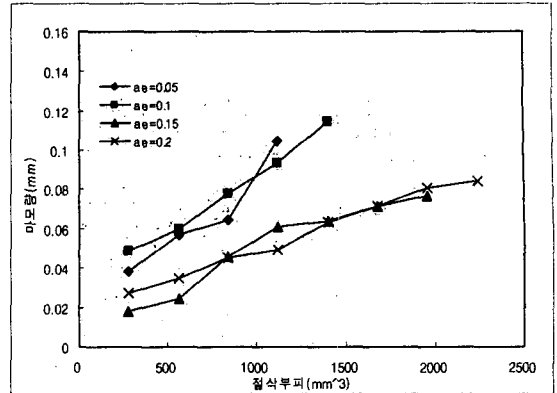


Fig. 11 Measured flank wear of $\phi 1\text{mm}$ ball endmill according to the variation of pick feed (CALMAX, $V_c=55\text{m/min}$, $a_p=0.05$, $f_z=0.03$)

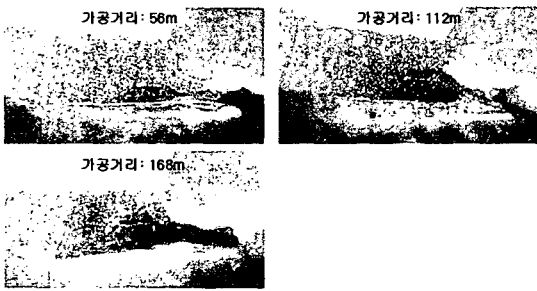


Fig. 9 Photographs showing progressive wear of flank surface for $V_c=40\text{m/min}$ ($a_p=0.05$, $a_e=0.1$, $f_z=0.03$)

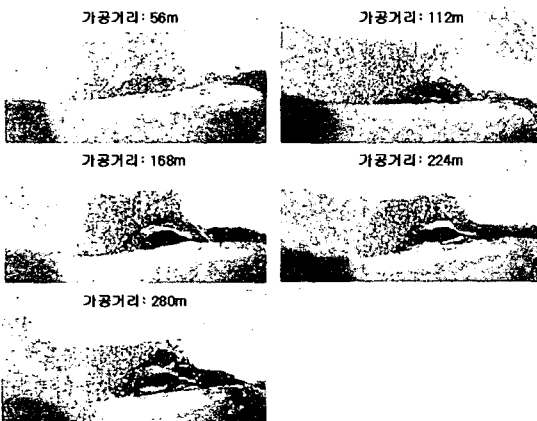


Fig. 10 Photographs showing progressive wear of flank surface for $V_c=55\text{m/min}$ ($a_p=0.05$, $a_e=0.1$, $f_z=0.03$)

로 얻을 수 있는 최대 절삭속도는 약 55m/min 로서 $\phi 2\text{mm}$ 볼엔드밀 가공시험에서와 마찬가지로 적정 절삭속도의 약 $1/7$ 로서 상당히 낮은 속도에서 가공이 이루어진다. 가공시편 및 공구경로는 $\phi 2\text{mm}$ 시험에서와 동일하며 평면을 Z-level 가공하는 것으로 실험하였다.

앞에서의 가공시험 결과에서 보듯이 일반적으로 절삭속도가 증가함에 따라 절삭력이 감소하고 공구의 마모성능도 좋아진다. $\phi 1\text{mm}$ 볼엔드밀 시험의 경우에도 유사한 결과가 예측되나 시험한 절삭속도가 추천값의 $1/7$ 정도 밖에 도달할 수 없으므로 절삭속도를 2 가지 경우 즉, 통상 사용하는 고속가공기 주축회전수가 $30,000 \sim 40,000$ RPM 임을 감안하여 $V_c=40, 55\text{m/min}$ 에서만 실험하였다. 그림 8 은 절삭속도 변화에 따른 마모시험 결과로서 $V_c=55\text{m/min}$ 으로 가공할 경우가 $V_c=40\text{m/min}$ 으로 가공할 때 보다 절삭거리가 약 1.5 배 증가하는 것을 보여주고 있으며 주축이 허용하는 최대 RPM 에서 가공해야 함을 알 수 있다.

그림 9 및 10 은 절삭거리 56m 씩 가공한 후 플랭크면의 마모부위를 촬영한 사진으로서 급격한 마모증가 없이 안정적인 가공이 이루어졌다.

그림 11 은 $V_c=55\text{m/min}$ 의 최대속도, 축방향 절입량 $a_p = 0.05\text{mm}$, 날당이송= 0.03mm 로 고정하고 pick feed $a_e=0.05, 0.1, 0.15, 0.2\text{mm}$ 로 변화시켰을 때의 공구마모를 시험한 결과이다. 절삭거리 기준으로 보면 $a_e=0.05\text{mm}$ 일 경우가 가장 절삭거리가 길지만 그림에서와 같이 절삭부피 기준으로 보면 $a_e=0.2\text{mm}$ 와 비교하였을 때 절삭부피로는 약 $1/2$, Feed 속도는 $1/4$ 로 MRR 이 8 배 정도 차이가 나

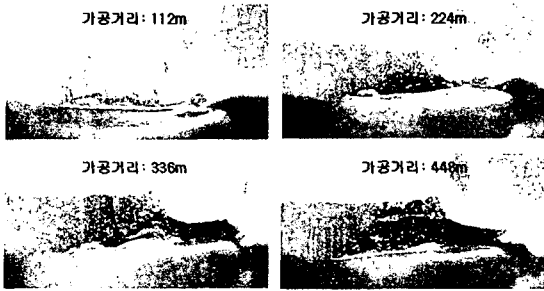


Fig. 12 Photographs showing progressive wear of flank surface for $ae=0.05\text{mm}$ ($ap=0.05$, $fz=0.03$, $Vc=55\text{m/min}$)

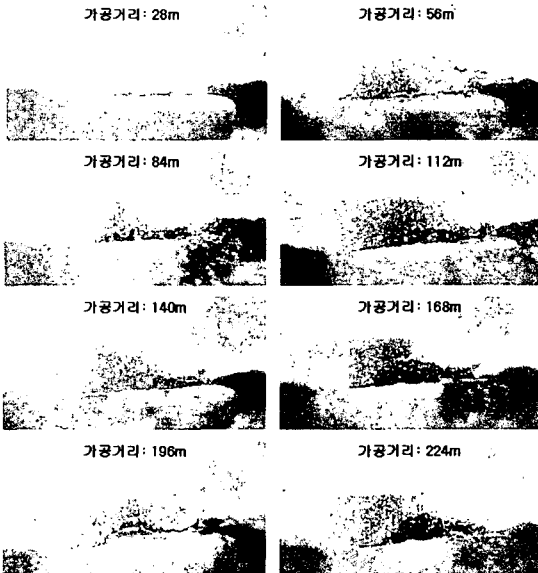


Fig. 13 Photographs showing progressive wear of flank surface for $ae=0.2\text{mm}$ ($ap=0.05$, $fz=0.03$, $Vc=55\text{m/min}$)

므로 pick feed 값을 크게 하는 것이 가공효율 및 마모측면에서 유리함을 알 수 있다. 그림 12 및 13 은 각각 $ae=0.05\text{mm}$, $ae=0.2\text{mm}$ 로 가공했을 때 플랭크면 마모부의 사진이다.

2.2.3 공구 Runout 의 영향

공구의 runout 은 가공품의 치수정밀도와 표면조도뿐만 아니라 공구의 이상마모와 파손에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 절삭공구는 공구홀더와 결합하여 주축에 장착되므로 최종 runout 은 공구 자체의 가공정밀도 뿐만 아니라 주축과 홀더의

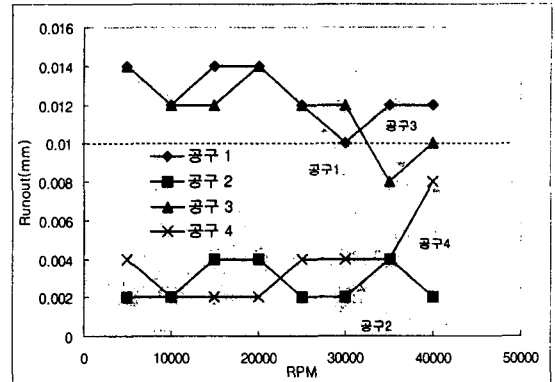


Fig. 14 Measured value of dynamic runout of 2mm ball endmills before cutting experiment.

회전정밀도에도 영향을 받는다. 통상 공구를 주축에 장착 후 회전시키지 않은 상태에서 접촉 또는 비접촉 측정을 하여 runout 을 check 한 후 가공을 하지만, 어떤 경우에는 정적인 runout 이 우수한 공구가 실제 가공할 회전수에서는 runout 이 오히려 악화되는 경우가 종종 발생한다. 특히, 소직경 공구는 큰 직경의 공구보다 강성도 작고 주축회전수도 높은 조건에서 가공을 하므로 공구 runout 의 영향이 상대적으로 크게 나타나므로 정적인 runout 값 뿐만 아니라 실제 가공할 RPM 에서의 runout 값을 측정하여 관리하는 것이 중요한 사항이 된다. 그림 14 는 $\phi 2\text{mm}$ 엔드밀 가공시험에 사용한 4 개의 공구를 가공시험 전에 측정한 runout 측정치로서 주축 회전수가 낮을 때는(5,000RPM 에서) 공구 1>공구 3>공구 4>공구 2 의 순서로 runout 값이 작지만 실제 가공할 RPM 에서의 측정치를 보면 공구 1 및 공구 3 은 회전수를 증가시키면 runout 이 좋아지지만 공구 4 는 runout 값이 $0.004\text{mm} \rightarrow 0.008\text{mm}$ 로 오히려 악화되고 있다.

그림 15 는 이 4 개의 공구를 112m 정도 가공한 후 공구 양쪽 날의 마모부를 촬영한 사진으로서 그림에서와 같이 가공할 RPM 에서의 runout 이 제일 큰 공구 1 의 편마모 현상이 제일 두드러지게 나타나고 나머지 3 개의 공구는 runout 에 의한 편마모가 크지 않다.

그림 16 및 17 은 runout 측정의 다른 예로서 전 RPM 범위에 걸쳐 runout 이 0.01mm 이하로 회전정밀도가 양호한 공구이다. 그림 17 에서 보는 바와 같이 측방향 절입량 0.1mm 씩 4 회 절삭한 후 마모부위의 형상을 보면 공구 양쪽날의 편마모 현상이 크게 나타나지 않았음을 보여주고 있다.

3. 결론

고경도 금형소재의 하드밀링 가공시 가공조건 선정을 위한 실험의 일환으로 $\Phi 2\text{mm}$ 이하 소직경 볼엔드밀의 고속가공시 마모특성 시험을 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 절삭속도를 크게 할수록 공구마모가 감소하고 균일한 마모가 진행되므로 소직경 공구는 기계가 허용하는 최대회전수에서 가공하는 것이 바람직하다.

(2) Pick feed 를 크게 할수록 공구의 마모성능이 향상되었고 황증삭의 경우 공구직경의 20~30% 까지 크게하여 가공하는 것이 공구마모 및 가공능률 측면에서 유리하다.

(3) 공구 runout 은 정적인 값 보다 실제 가공할 RPM 근처에서의 값을 측정하여 관리하는 것이 중요하고 runout 이 0.01mm 이하의 공구를 사용할 경우 공구 편마모에 크게 영향을 미치지 않았다.

후 기

본 연구는 2010 생산기반혁신기술개발사업 중 재영솔루텍(주)이 주관하는 납기단축을 위한 사출금형 고속가공기술개발의 세부과제 일부로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Yamada, Y., Aoki, T., Kitaura, S., Tanaka, Y., Okazaki, Y. and Hayasaki, H., 1997, High speed cutting performance of (Al, Ti)N coated carbide end mills for hardened steels, Proceedings of the first French and German Conference on High Speed Machining, University of Metz, France, pp 486-489.
- [2] Koshy, P., Dewes R.C. and Aspinwall D. K., 2002, High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~58 HRC), Journal of Materials Processing Technology, pp. 1-8.
- [3] 강창명, 김정석, 이득우, 임유엽, 2002, 고속가공에 의한 고경도재 QR090 코어부의 가공성 향상, 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 3 호, pp. 101-106.
- [4] 양진석, 2005, 고경도 금형강의 고속가공시 TiAlN 코팅된 볼엔드밀의 마모에 관한 실험적 연구, 생산기술연구논문집, 통권 11 호, pp59~72.

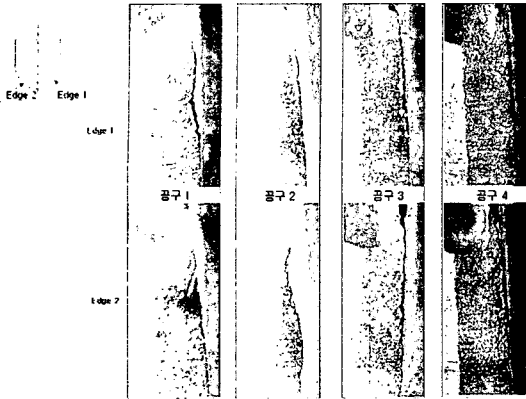


Fig. 15 Photographs showing both edges of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill after 112m cutting distance ($ap=0.1$, $ac=0.2$, $fz=0.06$).

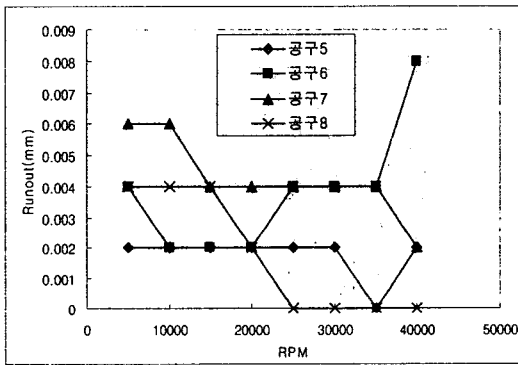


Fig. 16 Measured value of dynamic runout of another 2mm ball endmills before cutting experiment.

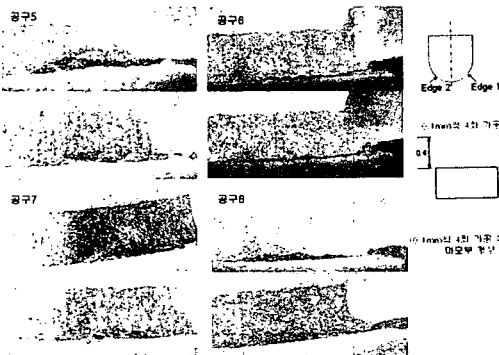


Fig. 17 Photographs showing both edges of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill after cutting 4 layers

Runout 이 0.01mm 이하일 경우에는 양쪽 날의 편마모에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.