

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

(Received September 9, 2005)

Abstract

High speed milling experiment on the hardened mold steel (CALMAX at hardness of HRC 55) is carried out using small diameter ball endmills. 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 the 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 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. 방전가공으로 하던 깊은 홈이나 리브가공을 밀링가공으로 대체할 경우 날 길이가 긴 소직경

공구로 가공해야 할 부위가 많이 생기게 된다. 이 경우 공구의 강성이 작기 때문에 절삭시 절입량을 크게 할 수 없어 가공시간이 길어지므로 금형 가공시 공구마모에 따른 공구교환 시점의 판단이 중요하다. 또한 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[1~3] 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

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀
2. 제영솔루션(株) 플라스틱응용기술 연구소
교신저자 : 한국생산기술연구원 정밀금형팀
E-mail : jsyang@kitech.re.kr

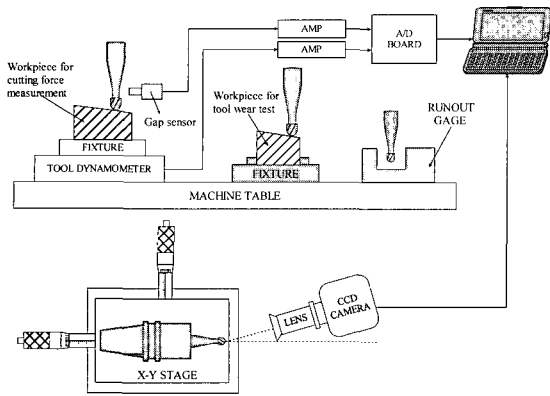


Fig. 1 Schematic diagram of cutting force and tool wear experiment system

볼엔드밀의 경우 발표된 고속가공 절삭실험 데이터가 많지 않다. 본 실험은 플라스틱 사출금형 제작에 많이 사용되는 금형강인 CALMAX 를 대상으로 볼엔드밀의 고능률 가공을 위한 가공조건을 파악하기 위한 연구의 일환으로 수행되었으며 ϕ 2mm 이하 소직경 볼엔드밀의 고경도 소재 가공 시 공구마모에 관련된 부분을 중심으로 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

공구 마모시험은 Fig. 1에서와 같이 가공기 테이블 위에 별도로 장착된 마모시험용 시편을 일정한 거리만큼 가공한 후 공구동력계 상부에 장착된 절삭력측정 시편을 가공하면서 절삭력을 측정 한 후 카메라로 공구의 마모부위를 촬영하여 마모량을 측정하며 이 과정을 공구가 마모한계에 도달할 때 까지 반복한다. 실험에 사용된 장치의 구성 및 사양은 Table 1과 같고 사용한 공구는 TiAlN 코팅된 ϕ 2mm, ϕ 1mm 초경 볼엔드밀이다.

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 기준으로는 보통 공구 플랭크면의 마모폭 크기를 기준으로 하지만 가공면의 조도 증가, 치핑의 크기를

Table 1 Specification of experimental equipments

Machine	Röders RFM760, 42000RPM
Dynamometer	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

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

	Cutting parameter		
	d > 3mm		d <
	Rough	Finish	2mm
Cutting speed Vc (m/min)	200	280	370
Axial depth of cut ap (mm)	0.1d	0.02d	0.096d
Radial depth of cut ae (mm)	0.3d	0.01d	0.3d
Feed per tooth fz (mm/tooth)	0.1	0.051	0.03d

동시에 고려해야 한다. 공구의 마모폭이 적더라도 일정크기 이상의 치핑이 발생하거나 표면조도가 일정한계를 넘어서면 마모한계에 도달한 것으로 판단한다.

2.2 실험결과 및 고찰

아래의 Table 2 는 실험에 사용한 공구의 제조사에서 제시한 가공조건이다. ϕ 2mm 이하 소직경 엔드밀의 경우에는 황·정삭의 구분 없이 주어졌고 축방향 절입량과 pick feed 의 최대치는 ϕ 3mm 엔드밀의 황삭과 동일한 비율이지만 절삭속도는 370m/min 으로 상당히 높다. 통상 사용하는 축방향 절입량이 약 0.2mm 인 것을 감안하면 소직경 공구로 적절한 절삭속도를 얻기 위해서는 10 만 RPM 이상의 주축회전수가 필요하다.

상기 Table 의 값을 참조하여 고속가공에 적합한 절삭속도 및 절입량의 영향을 판단하기 위한 시험조건을 선정하였다. 사용한 공구동력계가 250 Newton 까지 측정할 수 있는 소형이고 공구에 걸리는 과도한 절삭력을 피하기 위하여 축방향 절입량은 최대치의 50%인 0.05d 로, 날당 이송량은 0.03d 로 고정하였고 절삭속도와 pick feed 를 변경

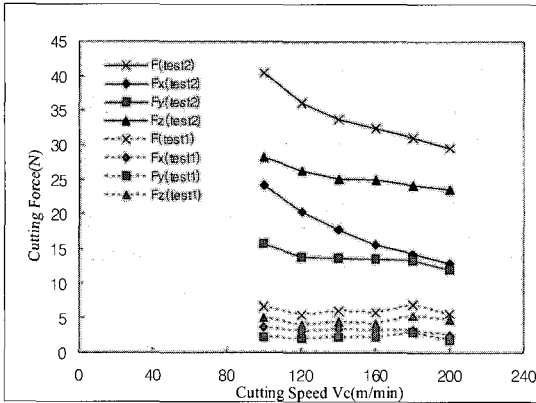


Fig. 2 Measured Cutting forces for $\Phi 3\text{mm}$ ball endmill according to the variation of cutting speed(STAVAX, Test2: $ap=0.15$, $ae=0.08$, $fz=0.04$, Test1: $ap=0.06$, $ae=0.03$, $fz=0.012$)

시커가면서 실험하였다. 유사한 경도의 금형강을 대상으로 한 $\phi 3\text{mm}$, $\phi 6\text{mm}$ 엔드밀의 가공실험 결과[4]를 보면 Fig. 2 에서와 같이 절삭속도가 추천값에 근접할수록 절삭력이 작아지고 공구의 마모특성도 좋아지는 결과를 얻었으므로 본 실험에서의 절삭속도 변화 범위는 추천값보다 아주 작은 값을 제외하였다.

Fig. 2 의 절삭시험에서는 시편의 경사면을 가공하면서 마모실험을 하였으나 공구의 빈번한 진입/진출에 의한 공구부하의 급격한 변화에 의해 인선에 치핑이 자주 발생하는 결과를 얻었으므로 본 실험에서는 치핑 발생을 줄이기 위해 평면을 Z-level 가공하는 공구경로를 사용하였다.

2.2.1 $\phi 2\text{mm}$ 볼엔드밀의 마모시험

본 실험에 사용한 고속가공기는 주축회전수가 최대 42,000RPM 이기 때문에 $\phi 2\text{mm}$ 볼엔드밀 가공시 축방향 절입량 $ap=0.1\text{mm}$ 로 평면을 가공할 때 얻을 수 있는 절삭속도는 약 110m/min 로서 추천 절삭속도인 370m/min 의 1/3 미만의 낮은 속도에서 가공이 이루어진다.

Fig. 3 은 절삭속도를 80~110m/min 으로 변화시키면서 마모를 측정한 결과이다. 그림에서 보듯이 실험한 속도영역 모두에서 이상마모나 치핑이 생기지 않고 안정적인 마모가 진행되었으며 절삭속도가 증가함에 따라 공구수명이 길어지는 결과를 얻었다. 따라서 사용 가공기의 주축 회전속도가 추천 절삭속도에 이르지 못할 경우 가공기가 허용

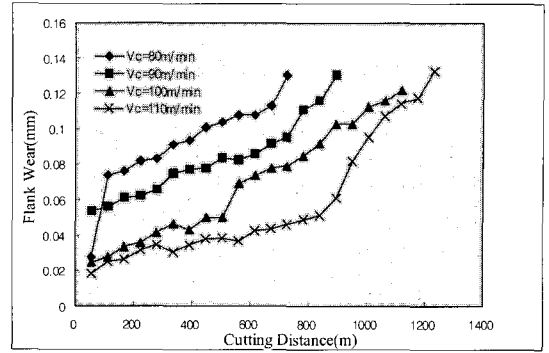


Fig. 3 Measured flank wear of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill according to the variation of the cutting speed (CALMAX, $ap=0.1$, $ae=0.2$, $fz=0.06$)

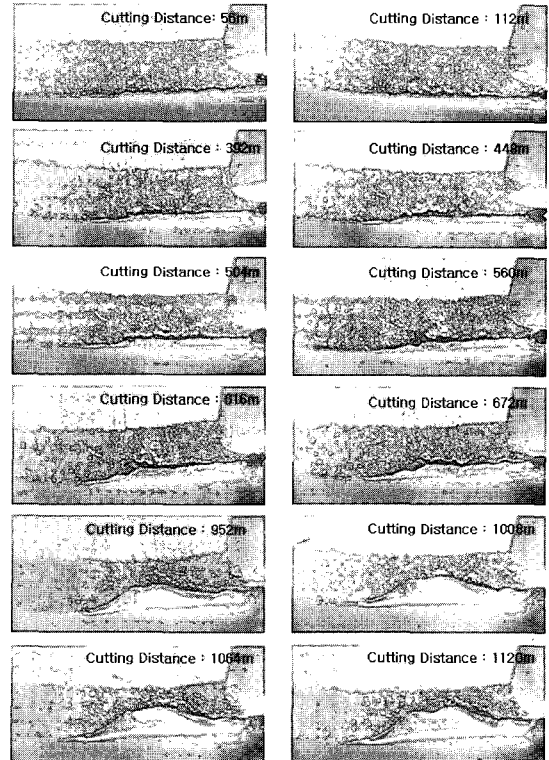


Fig. 4 Photographs showing progress of wear on the flank surface of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill for $Vc=100\text{m/min}$ ($ap=0.1$, $ae=0.2$, $fz=0.06$)

하는 최대 회전수에서 가공해야 공구수명도 증가시킬 수 있고 feed 속도도 높일 수 있어 소재제거율을 높일 수 있다.

Fig. 4 는 $V_c=100\text{m/min}$ 로 가공했을 때 절삭거리 에 따른 공구 플랭크면 마모부의 사진으로서 피삭재와의 접촉부 전체에 걸쳐서 비교적 균일한 마모가 진행된 것을 알 수 있다.

Fig. 5(a) 및 5(b)는 공구 마모가 가장 작은 절삭 속도인 $V_c=110\text{m/min}$ 에서 pick feed 를 $a_e=0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{mm}$ 로 변화시켰을 때 마모를 측정 한 결과 이다. Fig. 5(a)에서와 같이 절삭거리를 기준으로 보면 $a_e=0.2\text{mm}$ 이외의 조건에서는 절삭거리 차이가 크지 않으나 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.

본 실험에서 $a_e=0.2\text{mm}$ 인 경우가 다른 조건보

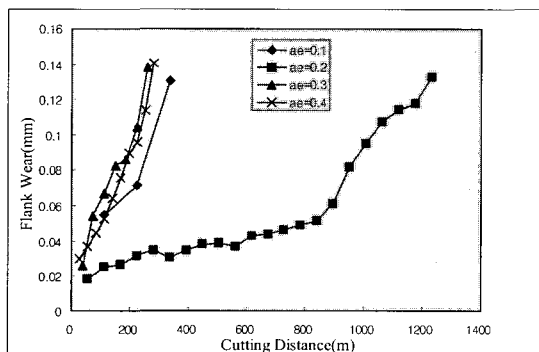


Fig. 5(a) Plot of the flank wear of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill versus cutting distance for $a_e=0.1\sim 0.4\text{mm}$ (CALMAX, $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0.1$, $f_z=0.06$)

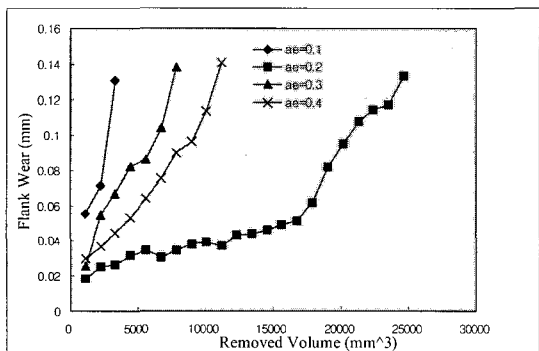


Fig. 5(b) Plot of the flank wear of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill versus cutting volume for $a_e=0.1\sim 0.4\text{mm}$ (CALMAX, $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0.1$, $f_z=0.06$)

다 특히 마모성능이 우수한 결과를 얻었으나 추 후 반복실험을 통하여 실험결과의 재현성을 확인 할 필요가 있는 부분으로 예측된다.

실제 황·중삭 가공시에는 절삭거리나 표면조 도 측면보다는 공구에 이상마모가 생기지 않는 한도 내에서 단위시간에 많은 체적을 제거하여 MRR (Material Removal Rate)을 높이는 것이 더 중 요한 성능지표가 될 수 있다. 이런 측면에서 Fig. 5(b)에서와 같이 절삭부피를 기준으로 보면 $a_e=0.2, 0.4, 0.3, 0.1\text{mm}$ 의 순서로 절삭부피가 크며 따라서 pick feed를 크게 하여 가공하는 것이 공구마모와 가공능률 측면에서 유리함을 알 수 있다. $a_e=0.1\text{mm}$ 와 $a_e=0.4\text{mm}$ 인 경우를 비교해 보면 후 자의 경우가 전자의 경우보다 절삭부피는 약 3배 이상 큰 반면 가공시간은 1/4로서 약 12배의 가 공능률 차이가 나게 되므로 허용한도 내에서 pick feed를 가능한 크게 하는 것이 절대적으로 유리함 을 알 수 있다.

Fig. 6, 7 은 각각 pick feed 를 0.1, 0.4mm 로 가공 했을 때 일정한 절삭거리마다 촬영한 플랭크면 마모부의 사진이다.



Fig. 6 Photographs showing progress of wear on the flank surface of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill for $a_e=0.1\text{mm}$ ($a_p=0.1$, $f_z=0.06$, $V_c=110\text{m/min}$)

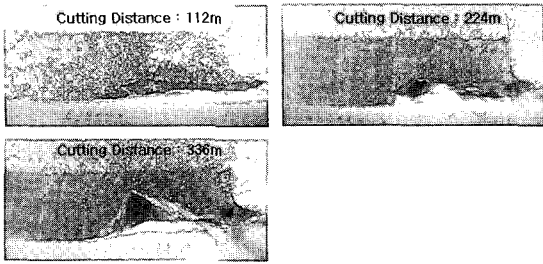


Fig. 7 Photographs showing progressive wear on the flank surface of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill for $a_e=0.4\text{mm}$ ($a_p=0.1, f_z=0.06, V_c=110\text{m/min}$)

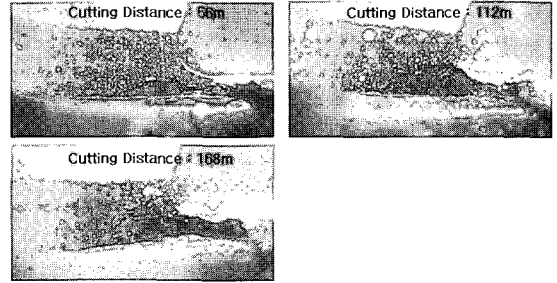


Fig. 9 Photographs showing progress of wear on the flank surface of $\Phi 1\text{mm}$ ball endmill for $V_c=40\text{m/min}$ ($a_p=0.05, a_e=0.1, f_z=0.03$)

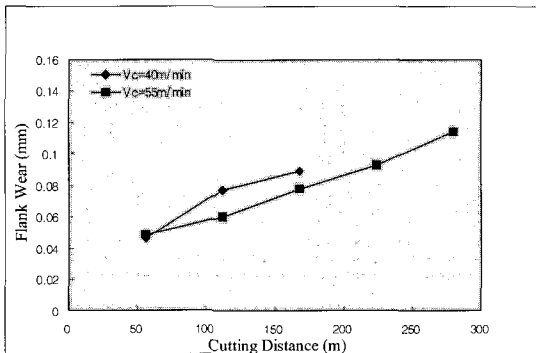


Fig. 8 Measured flank wear of $\Phi 1\text{mm}$ ball endmill according to the variation of cutting speed (CALMAX, $a_p=0.05, a_e=0.1, f_z=0.03$)

2.2.2 $\phi 1\text{mm}$ 볼엔드밀의 마모시험

$\phi 1\text{mm}$ 볼엔드밀 가공시 축방향 절입량 $a_p=0.05\text{mm}$ 로 얻을 수 있는 최대 절삭속도는 약 55m/min 로서 $\phi 2\text{mm}$ 볼엔드밀 가공시험에서와 마찬가지로 적정 절삭속도의 약 $1/7$ 의 상당히 낮은 속도에서 가공이 이루어진다. 가공시편 및 공구경로는 $\phi 2\text{mm}$ 공구시험에서와 동일하다.

앞의 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 $30,000\text{--}40,000\text{ RPM}$ 임을 감안하여 이에 해당하는 절삭속도인 $V_c=40\text{m/min}$ 와 55m/min 에서만 실험하였다.

Fig. 8 은 절삭속도 변화에 따른 마모시험 결과로서 $V_c=55\text{m/min}$ 으로 가공할 경우가 $V_c=40\text{m/min}$

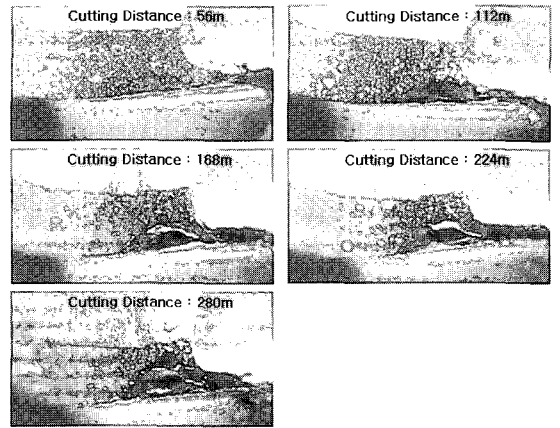


Fig.10 Photographs showing progress of wear on the flank surface of $\Phi 1\text{mm}$ ball endmill for $V_c=55\text{m/min}$ ($a_p=0.05, a_e=0.1, f_z=0.03$)

으로 가공할 때 보다 절삭거리가 약 1.5 배 증가하는 것을 알 수 있으며 주축이 허용하는 최대 회전수에서 가공해야 함을 알 수 있다.

Fig. 9 및 10은 절삭거리 56m씩 가공한 후 플랭크면의 마모부위를 촬영한 사진으로서 급격한 마모증가 없이 안정적인 가공이 이루어졌다.

Fig. 11은 절삭속도를 최대치인 $V_c=55\text{m/min}$, 축방향 절입량 $a_p=0.05\text{mm}$, 날당이송 $=0.03\text{mm}$ 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 절삭거리가 가장 길지만 그림에서와 같이 절삭부피 기준으로 보면 $a_e=0.2\text{mm}$ 와 비교하였을 때 절삭부피로는 약 $1/2$, 가공시간은 4배가 되므로 가공능률이 약 8배 정도 차이가 나므로 pick feed값을 크게 하는 것이 가공효율 및 마모측면에서 유리함을 알 수 있다.

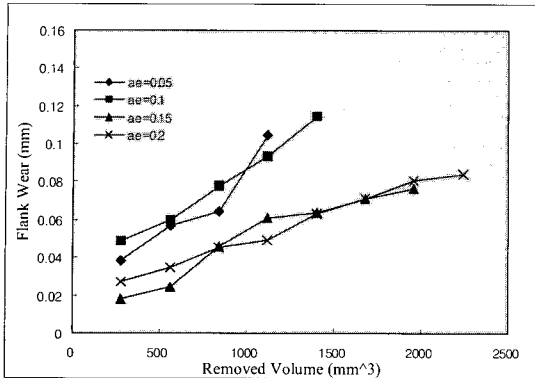


Fig.11 Measured flank wear of $\phi 1\text{mm}$ ball endmill according to the variation of pick feed (CALMAX, $V_c=55\text{m/min}$, $a_p=0.05$, $f_z=0.03$)

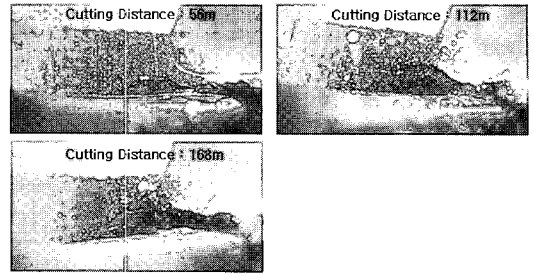


Fig.13 Photographs showing progress of wear on the flank surface of $\phi 1\text{mm}$ ball endmill for $a_e=0.05\text{mm}$ (CALMAX, $a_p=0.05$, $f_z=0.03$, $V_c=5\text{m/min}$)

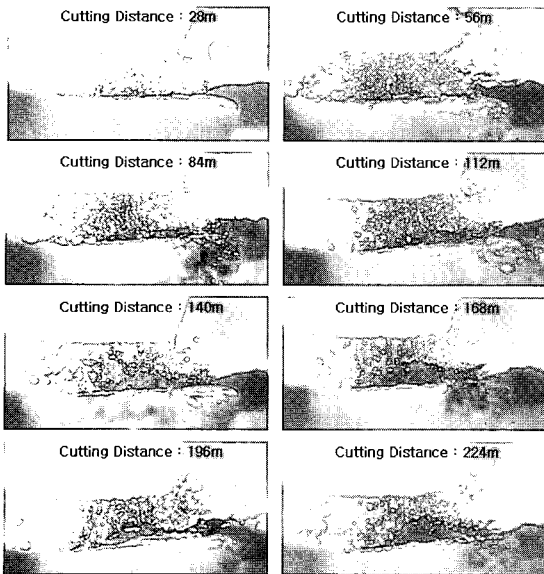


Fig.12 Photographs showing progressive wear of flank surface of $\phi 1\text{mm}$ ball endmill for $a_e=0.2\text{mm}$ (CALMAX, $a_p=0.05$, $f_z=0.03$, $V_c=5\text{m/min}$)

Fig. 12 및 13은 각각 $a_e=0.05\text{mm}$, $a_e=0.2\text{mm}$ 로 가공했을 때 플랭크면 마모부의 사진이다.

2.2.3 공구 Runout의 영향

공구의 runout은 가공품의 치수정밀도와 표면조도뿐만 아니라 공구의 이상마모와 파손에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 절삭공구는 공구 홀더와

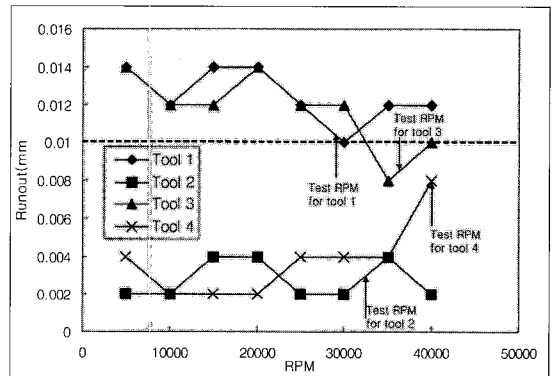


Fig.14 Measured value of dynamic runout of 2mm ball endmills before cutting experiment

결합하여 주축에 장착되므로 최종 runout은 공구 자체의 가공정밀도 뿐만 아니라 주축과 홀더의 회전정밀도에도 영향을 받는다. 통상 공구를 주축에 장착 후 회전시키지 않은 상태에서 접촉 또는 비접촉 측정을 하여 runout을 확인한 후 가공을 하지만, 어떤 경우에는 정적인 runout이 우수한 공구가 실제 가공할 회전수에서는 runout이 오히려 악화되는 경우가 종종 발생한다. 특히, 소직경 공구는 큰 직경의 공구보다 강성도 작고 주축회전수도 높은 조건에서 가공을 하므로 공구 runout의 영향이 상대적으로 크게 나타날 수 있으므로 정적인 runout 값 뿐만 아니라 실제 가공할 RPM에서의 runout 값을 측정하여 관리하는 것이 중요한 사항이 된다.

Fig. 14는 $\phi 2\text{mm}$ 엔드밀 가공시험에 사용한 4개의 공구를 가공시험 전에 측정된 runout 측정치로서 주축 회전수가 낮을 때는(5,000RPM에서) 공구

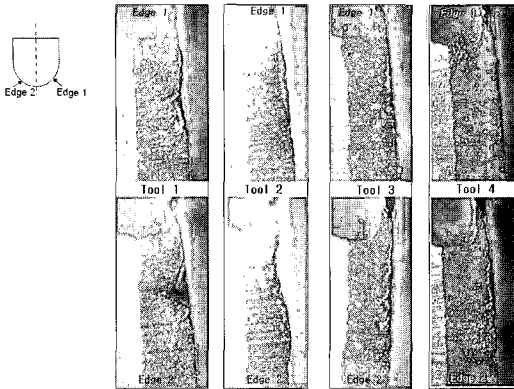


Fig.15 Photographs showing both edges of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill after 112m cutting distance ($ap=0.1, ae=0.2, fz=0.06$)

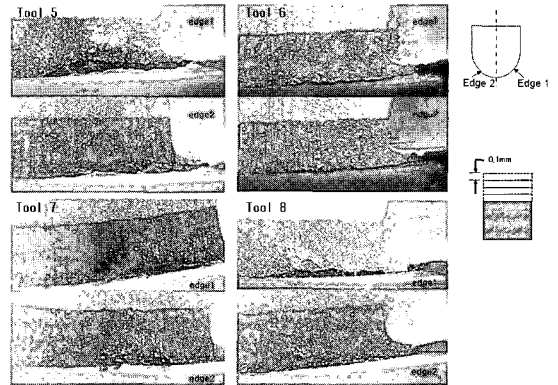


Fig.17 Photographs showing both edges of $\Phi 2\text{mm}$ ball endmill after cutting 4 layers

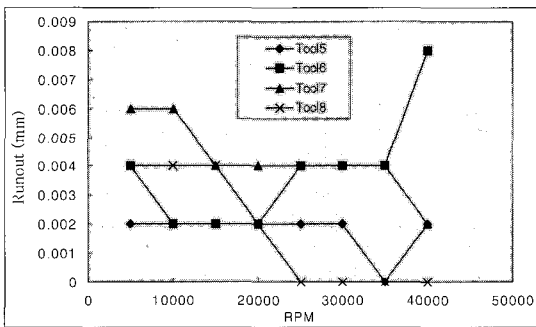


Fig.16 Measured value of dynamic runout of another $\Phi 2\text{mm}$ ball endmills before cutting experiment

1>공구 3>공구 4>공구 2 의 순서로 runout 값이 작지만 실제 가공할 RPM(수직 화살표 표시)에서의 측정치를 보면 공구 1 및 공구 3 은 회전수를 증가시키면 runout 이 좋아지지만 공구 4 는 runout 값이 0.004mm 에서 0.008mm 로 오히려 악화되고 있다.

Fig. 15 는 이 4 개의 공구를 112m 정도 가공한 후 공구 양쪽 날의 마모부를 촬영한 사진으로서 그림에서 보는바와 같이 실제 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.

Fig. 16 및 17 은 runout 측정의 다른 예로서 전 RPM 범위에 걸쳐 runout 이 0.01mm 이하로 회전정밀도가 양호한 공구이다. Fig. 17 에서 보는 바와 같이 축방향 절입량 $ap=0.1\text{mm}$ 씩 4 회 절삭한 후 마모부위의 형상을 보면 공구 양쪽날의 편마모

현상이 크게 나타나지 않았음을 보여주고 있다. Runout 이 0.01mm 이하일 경우에는 공구 편마모에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3. 결론

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

- (1) 절삭속도를 크게 할수록 공구마모가 감소하고 균일한 마모가 진행되므로 소직경 공구는 기계가 허용하는 최대 회전수에서 가공하는 것이 바람직하다.
- (2) Pick feed 를 크게 할수록 공구의 마모성능이 향상되었고 황·중삭의 경우 공구직경의 20~30% 까지 크게 하여 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 재영술루텍㈜이 주관하는 납기단축을 위한 사출금형 고속가공기술개발의 세부과제 일부로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Yamada, T. Aoki, S. Kitaura, Y. Tanaka, Y. Okazaki, H. Hayasaki, 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] P. Koshy, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, 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, 임유업, 2002, 고속가공에 의한 고경도재 QRO90 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, pp. 59~72.