

초경 볼 엔드밀의 TiAlN 코팅 처리조건이 건식가공환경에서 고경도 강재의 절삭 특성에 미치는 영향

박동순*, 원시태**, 이영주*, 허장희***

The Effect of TiAlN coated Ball End Mill on Cutting characteristic of High Hardness Steels in Dry Condition

D. S. Park, S. T. Won, Y. J. Lee, J. H. Hur

Abstract

This paper is studied on the effect of TiAlN coated ball end mill on cutting characteristic of high hardness steels in dry cutting condition without coolant. KP4 steels[HRC32] and STD11[HRC60] heat treated steels were used as the workpiece and WC-Co ball end mill and single and multi layer TiAlN coated ball end mill were utilized. Results showed that TiAlN coated ball end mill were increased the cutting length than WC-Co ball end mill in the cutting speed[245~320m/min] about 2~5 times for KP4 steels and about 2.7~4.3 times for STD11 heat treated steels. The multi layer TiAlN coated ball end mill is good about 1.2~1.7 times for KP4 steels and STD11 steels than single layer coated.

Key Words : Hardened Tool Steel (STD11, KP4), WC-Co Ball End Mill, Single layer TiAlN coated Ball End Mill, Multi layer TiAlN coated Ball End Mill, Machinability, Cutting Speed, Dry Cutting Condition

1. 서론

최근에는 금형, 항공기, 원자력등의 분야에서 티탄합금이나 초 내열합금, 열처리 강재등과 같이 재료 자체가 고 경도, 고 강도 및 고 인성의 특성을 갖는 난삭재가 사용되고 있으며 이들 재료에 대한 고정밀 및 고능률 가공의 요구가 급증하고 있는 실정이다. 따라서 공작기계의 측면에서는 강성증가, 열변형의 억제와 동적 안정성 및 응답성 개선을 통한 가공속도의 증가에 의한 생산성 및 가공 정밀도를 증대시키려는 방안이 강구되고 있고, 공구의 측면에서는 새로운 재료 및 코팅기법의 개발에 의한 가공속도의 고속화와 함께 공구 수명의 향상을 목표로 하고 있다.(1, 2, 3, 4)

한편 본 연구팀은 고경도 강재의 볼 엔드밀 가공시 공구형상과 절삭속도, 이송량, 절삭깊이 등의 절삭조건의 변화 및 극미량 절삭유공급, 건식등 가공환경조건이 절삭특성에 미치는 영향에 대한 다수의 연구 결과를 발표한바 있다.(5,6,7)

따라서 본 연구는 후속 연구의 일환으로 초경 볼 엔드밀의 PVD 에 의한 TiAlN 코팅 처리 조건이 대표적인 금형용 강재인 KP4 재와 STD11 열처리재를 볼 엔드밀 건식 가공시 절삭특성 및 공구 수명에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 피절삭재료

* 대한상공회의소 인천인력개발원

** 서울산업대학교 금형설계학과

*** ㈜ 계령 코리아

본 실험에 사용한 피절삭 재료는 대표적 금형용 강재중 비 열처리 강재인 KP4 재와 열처리 강재인 냉간 합금 공구강 STD11 을 선정하였다.

Table 1 은 이들 재료의 화학적 성분과 기계적 성질을 나타낸 것이고, Fig. 1 은 절삭특성을 검토하기 위한 시험편 형상과 크기를 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of workpieces

Material	Chemical composition					Machanical poperties			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	T.S. (kgf/mm ²)	Y.S. (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (HRC)
KP4	0.39	0.25	0.90	0.90	0.25	104	86	23.13	32
	~	~	~	~	~				
STD11	0.44	0.35	1.10	1.10	0.30	165	138	3.0	60
	1.40			11.00	0.80				
	~	0.40	0.60	~	~				
	1.60			13.00	1.20				

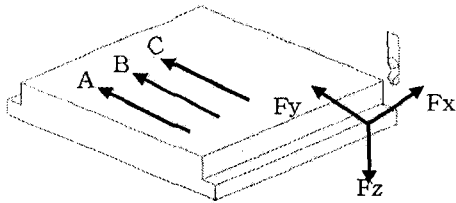


Fig. 1 Dimension of cutting test specimen(unit:mm)

2.2 볼 엔드밀공구

본 실험에 사용한 볼 엔드밀은 지름 6mm, 경사각 10° 및 여유각 9° 를 갖는 WC-Co(10%) 성분의 초경 볼 엔드밀(Tool A)과 이 초경재료에 PVD 에 의한 단층(Tool B)과 다층(Tool C)으로 TiAlN 코팅처리(Hv 3300~3500)를 한 3 종류의 볼 엔드밀을 사용하였다.

2.3 실험장치

본 실험에 사용한 공작기계는 머시닝센터(SPT-V40TS, 8000 rpm)를 이용하였고, 고속가공을 하기 위하여 주축에 HSC-Motor-Spindle(Type : KM3.5)장비를 설치하여 주축회전을 최대 30000rpm 까지 가능하게 하였다. 한편 절삭력의 측정을 위하여 압전형 공구동력계(Kistler 9253 A)를 머시닝센터 베드에 설치하고, 바이스를 이용하여 공작물을 고정하였으며 공구동력계에서 얻어진 신호는 다채널

증폭기(Kistler 5019 A)로 증폭되었고, 이 신호는 아날로그-디지털 변환기를 거쳐 컴퓨터로 전송된 후 Cutting Force Software(HP VEE)를 사용하여 데이터를 분석하였다.

2.4 절삭작업조건

절삭조건 선정은 건식가공으로 절삭속도 245~320m/min. 의 범위에서 KP 4 재는 이송량 0.2mm/rev., 절삭깊이 0.2mm 로, STD11 열처리재는 이송량 0.17mm/rev., 절삭깊이 0.2mm 로 선정하였으며 절삭작업 조건은 Table 2 와 같다.

Table 2 Cutting conditions to investigate cutting speed in ball milling test

Work Pieces	Cutting Condition	Cutting Speed (m/min.)	Feed per Revolution (mm/rev.)	Feed Rate (mm/min.)	Cutting Depth (mm)
KP4 (STD11)		245	0.2 (0.17)	2600(2210)	0.2
		283		3000(2550)	
		320		3400(2890)	

()는 STD11 열처리재 이송량 조건

2.5 절삭분력 측정방법

공구수명과 절삭력의 관계를 도출하기 위해서 피절삭재(270×270×50mm)를 사용하여 공구수명이 다할 때까지 공구의 멈춤이 없이 계속적인 가공을 하였다. 이때 절삭 3 분력(Fx, Fy, Fz)의 측정 위치는 Fig. 1 과 같이 가공면당 A, B, C 의 위치에서 가공거리 10m 마다 한번씩 절삭분력을 측정하였다. 한편 가공이 진행되는 동안 절삭력은 증가하는데 본 실험에서는 측정된 절삭의 3 분력 중 가장 크게 나타나는 분력(Fz)의 크기가 KP4 재의 경우 Tool A 는 약 100~110N 에서, Tool B 및 Tool C 는 200~220N 에 도달하면 가공을 중지하였으며, STD11 열처리재의 경우 Tool A 는 210~230N, Tool B 및 Tool C 는 300~320N 의 범위에 도달하면 가공을 중지하였다.

2.6 가공면 거칠기의 측정방법

가공면의 거칠기의 측정은 촉침식 표면조도계 [Model : M4pi, Range of indication : 0.002~50.0 μm, Cut off value : 480 (mm)] 를 이용하여, 한 면의 절삭가공이 완료된 후 Fig. 1 의 절삭력 측정위치(A, B, C)에서 10 점 평균 거칠기(Rz) 값을 측정하였다.

2.7 공구마모의 측정방법

공구의 마모량 측정은 공구형상 및 마모 측정이 가능한 장비[Model. Metronics QC-400]를 사용하였고 배율은 30~210 배, 정밀도는 0.002mm (2 μ m) 까지 측정할 수 있다. 전자스케일을 사용하여 측정하며 측정된 데이터는 디지털화면에 나타난다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2(a)~(f)는 각각 KP4 재[HRC32] 및 STD11 열처리재[HRC60]를 절삭깊이 0.2mm, 절삭속도 320m/min.의 조건으로 Tool A, Tool B 및 Tool C를 사용하여 건식(Dry)가공시 발생하는 Fx(반경방향 분력), Fy(이송방향 분력) 및 Fz(축방향 분력)의 절삭력 파형을 공구동력계로 측정한 것이다.

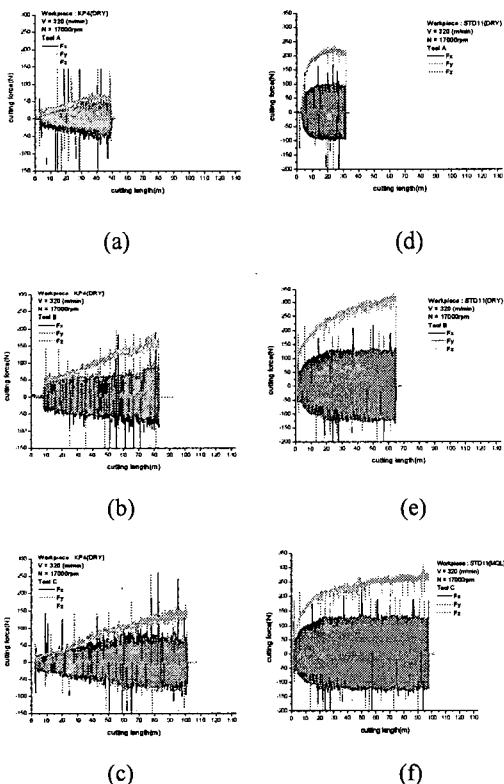


Fig. 2 Comparison of cutting force signals during the cutting points according to the 3 kind of tools for KP4(a,b,c)and STD11(d,e,f)

이 결과 먼저 KP4 재를 가공하는 경우에 발생하는 절삭분력의 특징은 Fig. 2(a)~(c)에서 보는 바와 같이 Fx 및 Fy의 분력은 Tool A, Tool B, Tool C 모두 절삭력의 크기가 0을 중심으로 양(+)과 음(-)의 양방향으로 크기가 같은 진폭의 파형이 나타

나며 가공길이가 증가할수록 이들 진폭의 크기는 서서히 증가하는 양상이 나타나고 있다. 그러나 Fz의 분력은 가공초기단계부터 양(+)방향의 절삭력이 나타나며 가공길이가 증가하면서 서서히 증가하는 양상이 나타나며 이 경향은 Fig. 2(d)~(f)의 고경도 강재인 STD11 열처리재를 가공하는 경우 나타나는 절삭분력의 특징에서도 비슷하다.

그러나 STD11 열처리재를 가공하는 경우 KP4 재의 차이점은 Fx 및 Fy 분력의 절삭력 진폭이 가공초기 단계부터 급격히 증가하고, 가공길이가 약 15m 이후 에서는 발생한 진폭의 크기가 큰 변화 없이 거의 일정하게 유지되고 있다. 또한 Fz 분력은 가공초기 단계부터 Fx 및 Fy 분력보다 큰 값을 갖고 급격한 절삭 힘이 증가하는 현상이 나타나고 있어서, 가공 소재의 경도값의 크기에 따라 발생하는 절삭력의 파형은 큰 차이가 나타나고 있음을 볼 수 있다.

한편 볼 엔드밀 공구의 차이에 의한 가공길이와 절삭분력의 관계를 공구수명의 관점에서 검토하면 초경 볼 엔드밀(Tool A)보다는 TiAlN 코팅 볼 엔드밀 (Tool B, Tool C)이, 코팅 볼 엔드밀 중에서는 단층 TiAlN 코팅 볼 엔드밀(Tool B)보다는 다층 TiAlN 코팅 볼 엔드밀(Tool C)의 경우가 KP4 재 및 STD11 열처리재를 가공할 때 가공길이를 증가시키고 있음을 볼 수 있다.

3.1 절삭속도의 크기와 절삭분력의 관계

Fig. 3(a)~(c)는 KP4 재를 절삭속도 245~320m/min.에서 건식 조건으로 가공하는 경우 가공길이의 증가에 따라 발생한 절삭분력(Fz)을 나타낸 것이다. 이 결과 Tool B의 경우에는 Tool A에 비해 가공길이가 약 2~4 배 증가하였으며, Tool C는 동일 절삭가공조건에서 Tool A에 비해 가공길이가 약 3.2~5 배 증가하였고, Tool B에 비해서는 약 1.3~1.7 배 정도 증가하였다.

한편 Fig. 3(d)~(f)는 STD11 열처리재를 각각 절삭속도 245~320m/min.에서 가공하는 경우 가공길이의 증가에 따라 발생한 절삭분력(Fz)을 나타낸 것이다. 이 결과 STD11 열처리재는 Tool A, Tool B 및 Tool C 공구 모두 가공초기 단계에서 가공길이가 약 10m 될 때까지 급격히 증가하고 이후 서서히 Fz 값이 상승하는 공통적인 경향이 나타나고 있으며, Tool B를 사용한 경우에는 Tool A에 비하여 가공길이는 약 2.6~3.4 배 정도 증가하였다.

또한 Tool C를 사용한 경우가 높은 절삭속도

245m/min.에서의 가공길이는 약 62m 를 나타내어 Tool B 의 가공길이와 비슷하지만, 절삭속도가 높은 283m/min. 및 320m/min.에서의 가공길이는 약 80m 를 나타내고 있어서 Tool A 에 비해 가공길이가 약 2.7~4.3 배, Tool B 에 비해서는 약 1.2~1.3 배 증가하는 경향이 나타났다.

이 결과는 김중성(8)이 공구의 TiAlN 코팅시에는 단층코팅보다는 인성이 크고 다양한 기계적 특성을 갖는 얇은 막을 여러 층으로 증착시키는 다층코팅이 표면에서의 응력 집중을 완화시키고 균열 진전을 방해하며 또한 모재와 코팅층의 계면 또는 코팅층 사이에서 더욱 우수한 밀착력을 갖는다고 한 결과와 일치하고 있다.

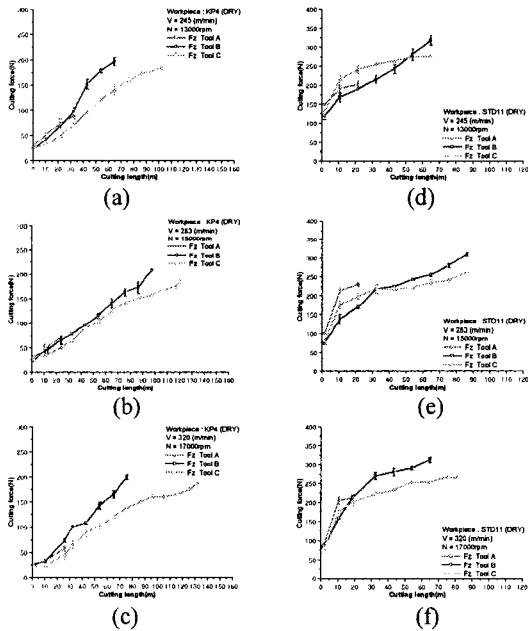


Fig. 3 Comparison of cutting force Fz according to the cutting length for the 3 kind of tools for KP4(a,b,c) and in machining the hardened STD11(d,e,f)

3.2 절삭속도의 크기와 가공면 거칠기의 관계
 Fig. 4(a)~(c)는 KP4 재의 가공시 가공길이의 증가에 따른 가공면 거칠기(Rz)의 관계를 나타낸 것으로 Tool A 는 가공 시작 후 곧 공구선단 인선부의 파손으로 가공면 거칠기의 측정이 무의미 하였으며, Tool C 를 사용한 경우에 절삭속도 320m/min.에서 가공길이가 약 128m 일때 Rz 값이 약 8.5 μm 으로 가장 양호한 가공면 거칠기를 나타냈다. 한편 Fig. 4(d)~(f)는 STD11 열처리재의 가공시 가공길이의

증가에 따른 Rz 의 관계를 나타낸 것으로 Tool A 는 KP4 재를 가공하는 경우와 같은 결과를 보였으며, Tool B 로 가공시에는 절삭속도 283m/min.에서 가공길이가 약 80m 에서 Rz 값이 약 3.1 μm 으로 나타나고 있다. 또한 Tool C 로 가공시에는 절삭속도 283m/min.에서 가공길이가 약 80m 에서 Rz 값이 약 3.0 μm 으로 나타나고 있어서, 고경도 강재인 STD11 열처리재를 가공하는 경우 가공한계길이에 서 나타나는 가공면 거칠기 (Rz)값은 약 3~4 μm 의 범위에서 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이 결과는 KP4 재를 가공하는 경우의 가공면 거칠기 9~10 μm 보다 우수한 가공면이 나타나며, 불 앤드밀 가공시 경도가 매우 높은 STD11 열처리재가 상대적으로 경도가 낮은 KP4 재보다 가공한계길이는 짧으나 가공면 거칠기는 더욱 양호한 결과가 나타나고 있음을 알 수 있었다. 상기 결과는 최상우(9) 등이 STD11 재를 다양한 열처리를 행하여 경도값을 HRC16~HRC50 까지 변화시킨 후, CBN 불 앤드밀로 절삭한 경우 피삭재의 경도가 높을수록 우수한 가공면이 나타난다는 결과와 잘 일치하고 있다

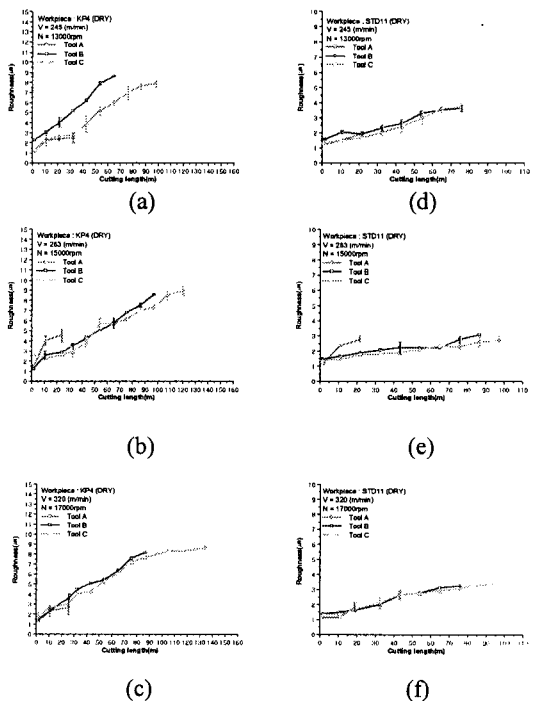


Fig. 4 Comparisons of the Rz according to the cutting length for the 3 kind of tools for KP4(a,b,c) and the hardened STD11(d,e,f)

3.3 절삭속도의 크기와 공구마모량의 관계

볼 엔드밀 가공시 발생하는 공구 마모의 형태는 플랭크 마모, 크레이트 마모, 칩핑 등의 형태가 나타나고 있으며, 이들 중 플랭크 마모가 가장 일반적으로 발생하는 것으로 알려져 있다.(10,11), 본 실험의 경우에도 공구에 발생하는 마모형태는 플랭크 마모가 지배적으로 나타나기 때문에 플랭크 마모를 중심으로 검토하였으며, 이때 Tool A는 KP4 재와 STD 11 열처리재 모두 가공 초기에 공구 선단의 인선부에서 깨짐이 발생하여 공구마모량의 측정은 제외하였다. 한편 Fig. 5의 (a) 및 (b)는 각각 KP4 재와 STD11 열처리재를 Tool B와 Tool C를 사용하여 가공속도 245~320m/min에서 건식 조건으로 가공하는 경우 가공길이에 따른 공구마모량의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과 절삭속도 320m/min.에서 Tool C를 사용한 경우 KP4 재는 가공길이 132m에서 공구마모량은 약 0.082mm가 발생하였고, Tool B는 가공길이 약 125mm에서 비슷한 크기의 공구마모량이 발생하였다. 한편 STD11 열처리재는 절삭속도 283m /min.에서 건식 가공시 Tool C는 가공길이 약 87m에서 공구마모량이 약 0.102 mm 발생하였으나, Tool B는 약 65mm 가공길이에서 비슷한 공구마모량이 발생하였다. 따라서 공구마모량의 관점에서 Tool C가 Tool B에 비해 우수한 결과를 나타내고 있다.

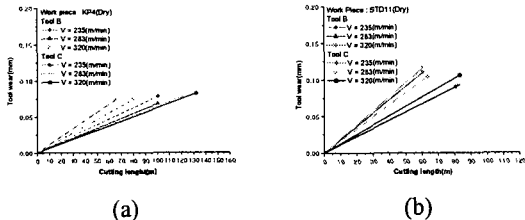


Fig. 5 Variation of the tool wear for the various cutting speeds in machining the KP4(a) and the hardened STD11(b)

3.4 절삭속도의 크기와 가공한계길이와의 관계

Fig. 6의(a) 및 (b)는 각각 KP4 재 및 STD11 열처리재에 대한 절삭속도의 크기와 가공 한계길이와의 관계를 나타낸 것으로 초경 볼 엔드밀인 Tool A는 KP4 재와 STD11 열처리재를 가공할 때 절삭속도가 상대적으로 가장 적은 245m/min.에서 제일 좋은 결과를 나타내고 있으며, TiAlN 단층 코팅 공구인 Tool B는 KP4 재를 가공시 절삭속도 283m/min.에서 가장 양호한 가공한계길이를

갖는다.

한편 TiAlN 다층 코팅 공구인 Tool C는 KP4 재 및 STD11 열처리재 모두 상대적으로 절삭속도가 가장 큰 320m/min.에서 가공한계길이가 가장 크게 나타나고 있으며, Tool A 및 Tool B에 비하여 모든 절삭속도에서 가공한계길이를 크게 증가시키고 있음을 알 수 있다. 그러나 Tool C는 고경도 강재인 STD11 열처리재의 가공시 절삭속도가 상대적으로 작은 245m/min. 및 283m/min.에서는 Tool B와 비슷한 가공한계길이를 나타내고 있어서 중경도 강재인 KP4 재의 가공시 나타나는 TiAlN의 다층 코팅에 의한 효과가 크게 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 Tool C 공구의 경우에는 본 실험에서 사용한 절삭속도 범위 보다 더 큰 절삭속도에서 더욱 우수한 절삭특성이 기대되며 이에 대한 평가가 필요하다고 생각된다.

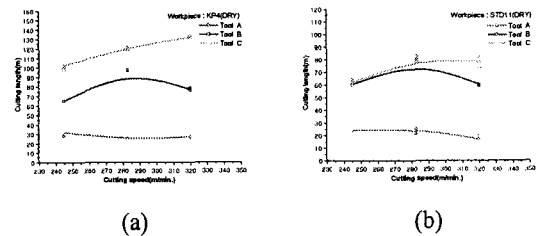


Fig. 6 The maximum cutting length for the cutting speeds in machining the KP4(a) and the hardened STD11(b) (Tool : A, B, C Type)

3.5 절삭속도와 공구수명과과의 관계

공구수명에 미치는 절삭조건 영향은 일반적으로 절삭 속도, 이송량, 절삭깊이의 순서로 나타나며(11), 본 실험의 경우 Table2의 절삭작업 조건에 의해, Tool A, B, C의 볼엔드밀을 사용하여 절삭속도의 변수에 따라 가공시 발생하는 절삭력의 크기, 가공면 거칠기 및 공구마모량의 관계를 종합적으로 검토하여 가공한계를 결정하였고, Taylor의 공구수명식(11)인 $VT^n = C$ 에서 지수 n 값과 상수 C 값을 구하였다.

한편 Fig. 7과 8은 각각 KP4 및 STD11 열처리재의 볼 엔드밀 가공시 절삭속도와 공구수명시간과의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과 KP4 재 가공시 Tool A는 $n=1.49$, $C=10312$, Tool B는 $n=0.28$, $C=764$, Tool C는 $n=0.29$, $C=918$ 의 값을 가지며 STD11 열처리재 가공시 Tool A는 $n=1.9$, $C=23042$, Tool B는 $n=0.94$, $C=7161$, Tool C는 $n=0.14$, $C=468$ 의 값을 갖는다.

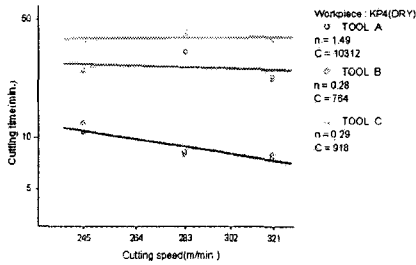


Fig. 7 The relation between cutting speeds and cutting times according to the tool A, tool B and tool C for the KP4

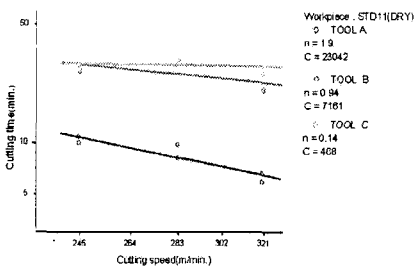


Fig. 8 The relation between cutting speeds and cutting times according to the tool A, tool B and tool C for the STD11

4. 결론

대표적인 금형용 강재인 KP4 재[HRC32]와 STD 열처리재[HRC60]를 건식가공시 WC-Co 초경 및 이 초경재료에 PVD 에 의한 단층과 다층 TiAlN 코팅 처리한 3 종류의 불 엔드밀에 대한 절삭특성을 검토하고 다음의 결론을 얻었다.

1. 초경 불 엔드밀(Tool A)에 비해 TiAlN 코팅 처리공구(Tool B 및 Tool C)는 KP4 재를 가공하는 경우 약 2~5 배, STD11 열처리재를 가공하는 경우 약 2.7~4.3 배 가공한계길이를 증가시키므로서 비 코팅공구에 비해 TiAlN 코팅 공구의 수명이 크게 향상되었다.

2. 다층 TiAlN 코팅공구(Tool C)는 단층 TiAlN 코팅공구(Tool B)에 비해 KP4 재를 가공하는 경우, 가공한계길이를 약 1.3 ~ 1.7 배 증가시키고, STD 11 열처리재를 가공하는 경우, 절삭속도가 상대적으로 낮은 245m/min.에서는 가공한계길이가 큰 변화가 없으나, 절삭속도가 상대적으로 큰 283~320 m/min.에서는 약 1.2~1.3 배 증가시킨다.

3. TiAlN 코팅 공구 중 다층처리공구(Tool C)의 절삭특성이 단층처리공구(Tool B)보다 절삭특성이 우수하게 나타난 것은 다양한 기계적 특성을 갖

는 얇은 경질화합물을 여러 층으로 증착시켜 표면에서의 응력 집중과 공구의 균열진전의 조건을 개선시키는 것으로 생각되며, 특히 고경도 강재보다 중경도 강재의 절삭 가공시 더욱 큰 효과를 나타내었다.

참고 문헌

- (1) Lee. D. W., "High Speed Ball End Milling for Difficult-to-cut Materials", Proceedings of the International Machine Tool Technical Seminar, 2000.6. Seoul, Korea, PP. 21~26.
- (2) T. Majiama, "Development of ultra high speed milling machine", proceeding 6th International Machine Tools Engineering, Osaka, Japan, 1995, PP. 61~83
- (3) T.Aizawa et al., "Self-lubrication of nitride ceramic coating by the chlorine ion implantation", Surface and Coatings Technology 177~178, 2004, PP.573~581
- (4) D.Y.Jang, S.T.Won, "Effect of Ball End Mill Geometry and Cutting Conditions on Machinability of Hardened Tool Steel", KSTLE. Vol.3, No.1,6.2002, PP.17~22.
- (5) 이영주의, 불엔드밀 옆날 여유각이 고경도강재의 절삭특성에 미치는 영향, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, 2002, PP.211~216.
- (6) 원시태외, 불엔드밀 가공환경조건이 고경도 강재의 절삭특성에 미치는 영향, 한국소성가공학회, Vol.13, No1, 2004, PP.45~52.
- (7) 박동순외, 고경도 강재의 MQL 가공시 초경불 엔드밀의 TiAlN 코팅조건이 절삭특성에 미치는 영향, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, 2004, PP.245~251.
- (8) 김종성, "금속 절삭공구에 대한 PVD 코팅기술의 동향", 한국정밀기계공학회지, 제 18 권, 제 8 호, 2001, PP.11~16,
- (9) 최상우외, "CBN 불 엔드밀의 마모 메커니즘에 관한 연구", 한국정밀가공학회지, 제 14 권, 제 12 호, 1977.12, PP.121~126.
- (10) 이정길외, "고속용 엔드밀의 성능평가에 관한 연구", 한국정밀가공학회, 추계학술대회 논문집, 2000, PP.833~837.
- (11) N.H.Cook, "Tool Wear and Tool Life", J. of Engineering for Industry, Trans. of ASME, 1973, PP.931~938.