

볼 엔드밀 가공환경조건이 고경도 강재의 고속절삭특성에 미치는 영향

이영주* · 원시태** · 허장희*** · 박동순* · 김은수** · 김기표**

The Effect of Ball End Mill Cutting Environments on High Speed Machinability of Hardened Tool Steel

Y.J.Lee, S.T.Won, J.H.Hur, D.S.Park, E.S.Kim, K.P.Kim

Abstract

This research conducted milling tests to study effects of cutting environment conditions of ball end mills on the characteristics of high speed milling cutting process. KP4 steels and STD11 heat treated steels were used as the workpiece and WC-Co ball end mill tools with TiAlN coated were utilized in the cutting tests. Dry cutting without coolant and semi-dry cutting using botanical oil coolant by the MQL(Minimum Quantity Lubricant) device were conducted. Cutting forces, tool wear and surface roughness were measured in the cutting tests. Results showed that MQL spray cutting of KP4 and hardened STD11specimens produced better surface quality and wear performance than dry cutting did.

Key Words : Hardened Tool Steel (STD11, KP4), Ball End Milling, High Speed Machinability, Feed per Revolution, Dry Cutting, Minimum Quantity Lubrication(MQL)

1. 서 론

최근에는 고정밀도를 갖는 공작기계 및 공구재료와 코팅처리 기술의 개발과 함께 많은 연구자들이 전에는 고려할 수 없었던 고강도, 고경도 재료와 같은 난삭재의 절삭가공에 많은 관심을 갖고 있으나(1, 2, 3) 가혹한 절삭조건에 의한 공구의 마모가 큰 문제점으로 나타나고 있으며, 아직도 이들 재료의 절삭가공시 가공 메커니즘이 명확하게 규명되어 있지 않은 실정이다.(4,5)

한편 절삭가공시에는 칩의 원활한 배출과 절삭열의 효과적인 제거를 위해 절삭유를 사용하여 왔으나(6) 비산, 누설, 악취 등의 작업환경의 악화와 함께 윤활성능의 향상을 위한 염소, 유황, 인 등의 극압첨가제 사용은 많은 유해물질을 발생시

키는 것으로 보고 되고 있다.(7)

따라서 선진국에서는 작업환경에 대한 규제가 강화됨에 따라 최근에는 환경친화적인 공작기계의 개발과 함께 환경 친화적인 절삭유 및 절삭유 처리기술의 개발에 대한 연구와 더불어 절삭유를 효율적으로 공급하여 공구수명을 향상시키고, 가공 정밀도를 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 에코 머시닝(Eco-Machining)기술은 환경대응 가공기술로서 절삭유를 전혀 사용하지 않고 코팅공구를 이용하는 순수한 건식가공(Dry Cutting)과 -30℃의 냉각공기를 이용하는 냉풍 가공 기술(Cold Air Cutting) 및 환경 친화적인 식물성 오일을 미스트(Mist)로 만들어 극미량(Minimum Quantity Lubrication)공급에 의한 세미건식가공(Semi Dry Cutting)에 대한 연구가 활발히 진행되고

* 서울산업대 산업대학원 정밀기계공학과

** 서울산업대학교 금형설계학과

*** ㈜ 계령 코리아

있다. (8,9,10)

한편 볼 엔드밀 가공시 가공환경조건이 고경도 강재의 절삭특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 전보(11)에서는 대표적인 금형용 강재인 KP4 와 STD11 열처리재를 TiAlN 코팅 초경 볼 엔드밀 공구를 사용하여 건식 및 극미량 절삭유 공급에 의한 세미건식가공을 저속에서 실시한 결과 볼 엔드밀 가공시 절삭깊이가 크고 저속가공인 경우에는 건식가공조건이 MQL 가공환경조건보다 가공특성이 더 바람직한 결과를 나타내바 있다. 따라서 본 연구에서는 고경도강재의 고속가공시에는 이들 가공환경 조건이 절삭특성에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 피절삭재료

본 실험에 사용한 피절삭 재료는 전보(11)에서 사용한 재료와 동일하며, Table 1 은 KP4 재와 STD11 열처리재의 화학적 성분과 기계적 성질을 나타낸 것이고, Fig. 1 은 고속가공의 절삭특성을 검토하기 위한 시험편 형상을 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of workpieces

Material	Chemical composition					Machinical poperties			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	T.S. (kgf/mm ²)	Y.S. (kgf/mm ²)	Elong ation (%)	Hard ness (HRC)
KP4	0.39	0.25	0.90	0.90	0.25	104	86	23.13	32
	~	~	~	~	~				
STD11	1.40			11.00	0.80	165	138	3.0	60
	~	0.40	0.60	~	~				
	1.60			13.00	1.20				

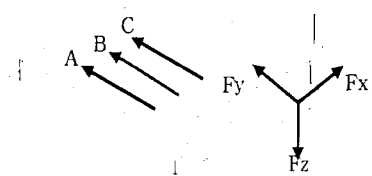


Fig. 1 Diminon of cutting test specimen

2.2 볼 엔드밀공구

본 실험에서 사용한 볼 엔드밀은 지름 6mm, 경사각 10° 및 여유각 9° 를 갖는 WC-Co(10%)성분의 초경합금에 PVD 에 의한 TiAlN 코팅처리 (HV3500)를 하였다.

2.3 실험장치

본 실험에 사용한 공작기계는 머시닝센터(SPT-V40TS, 8000rpm)를 이용하였고, 고속가공을 하기 위하여 주축에 HSC-Motor-spindle(Type : KM3.5)장비를 설치하여 주축회전을 최대 30000rpm 까지 가능하게 하였다. 또한 절삭력의 측정을 위하여 압전형 공구동력계(Kistler 9253 A)를 머시닝센터 베드에 설치하고 바이스를 이용하여 공작물을 고정하였다. 공구동력계에서 얻어진 신호는 다채널 증폭기(Kistler 5019 A)로 증폭되었고, 이 증폭된 신호는 A/D 컨버터 (DT3001)를 거쳐 디지털화 되어 컴퓨터로 전송되었다. 컴퓨터에서는 Cutting Force Software(HP VEE)를 사용하여 데이터를 분석하였다. 한편 가공환경조건은 건식가공과 함께 MQL 장치에 의한 세미 건식가공을 실시하였고, Table 2 는 MQL 장치에 의한 절삭유 분사조건을, Fig. 2 는 MQL 장치의 구성도를 나타낸 것이다.

Table 2 Spray conditions of minimum quantity lubrication system

Conditions of MQL	Capacity
Temperature of compressor air(°C)	20
Pressure of compressor air (bar)	5
Tube lengths (m)	3
Nozzle diameter (mm)	10
Spray nozzle angle (°)	10
Cutting fluid	Shell oil (L005)
Spray capacity	50ml/hr

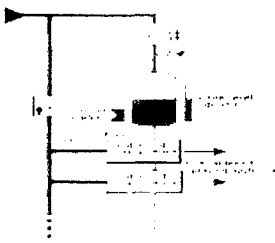


Fig. 2 Apparatus of minimum quantity lubrication system

2.4 절삭작업조건

KP4 재와 STD11 열처리재의 고속절삭 특성을 검토하기 위한 절삭속도와 이송량 및 절삭깊이의 조건은 Table 3 과 같다.

Table 3 Cutting conditions to investigate cutting speed in ball end milling test

Work pieces	Cutting Condition	Cutting Speed (m/min.)	Feed per Revolution (m/min.)	Feed Rate (mm/min)	Cutting Depth (mm)
KP4		245	0.2	2600	0.2
		264	0.2	2800	
		283	0.2	3000	
		302	0.2	3200	
		320	0.2	3400	
Hardened STD11		245	0.17	2210	
		264	0.17	2380	
		283	0.17	2550	
		302	0.17	2720	
		320	0.17	2890	

2.5 절삭분력 측정방법

공구수명과 절삭력의 관계를 도출하기 위해서는 공구수명이 다할 때까지 공구의 멈춤이 없이 계속적인 가공을 하기 위하여 Tool Dynamometer (640×400mm)와 피삭재(270×270×50mm)를 사용하여 가공하였다. 고속가공시 절삭 분력의 측정위치는 Fig. 1 과 같이 절삭 3 분력(Fx, Fy, Fz)이 정상 상태의 가공이 이루어지고 있는 중앙 부위의 가공 면당 A, B, C 의 위치에서 가공거리 10m 마다 한번씩 절삭분력을 측정하였다.

한편 고속가공이 진행되는 동안 절삭력이 증가하는데 본 실험에서는 측정된 절삭의 3 분력 중 가장 크게 나타나는 분력(Fz)의 크기가 KP4 재의 경우에는 약 200~220N 에서, STD11 열처리재의 경우에는 약 300~350N 에 도달하면 가공을 중지하였다.

2.6 가공면 거칠기의 측정방법

가공면 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)의 10 점 평균거칠기 (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 μm) 까지 측정할 수 있다. 전자스케일을 사용하여 측정하며 측정된 데이터는 디지털화면에 나타난다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가공환경조건과 고속절삭특성의 관계

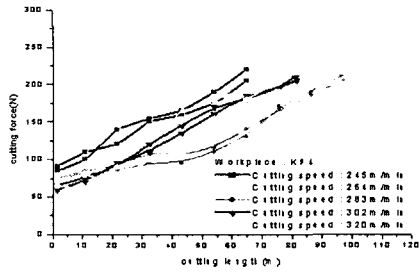
3.1.1 가공환경조건과 절삭분력의 관계

Fig. 3 (a), (b)는 KP4 재(HRC32)을 절삭깊이 0.2mm, 이송량 0.2mm/rev.을 기준으로, Fig. 4 는 열처리 STD11 재(HRC60)를 절삭깊이 0.2mm, 이송량 0.17mm/ rev.를 기준으로 하여 각각 245m/min.~320m/min.의 절삭속도로 볼 엔드밀 고속가공시 건식 및 극미량 절삭유 공급에 의한 조건으로 각각의 절삭속도에 대한 가공초기 단계에서부터 가공 마지막 단계까지 발생한 Fz 분력과 가공길이의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과 KP4 재의 경우에는 절삭속도 283m/min.에서 건식 및 MQL 가공조건 모두 우수하며, STD11 열처리재의 경우에서도 건식 및 MQL 가공조건 모두 절삭속도 283m/min.에서 볼 엔드밀 가공 중 발생하는 절삭력의 변화를 고려 할 때 가장 바람직한 가공속도로 나타나고 있다. 그러나 KP4 재 및 STD11 열처리재 모두 절삭속도 283m/min.에서도 건식가공보다는 MQL 가공조건이 절삭분력의 특성이 더 우수하게 나타난다. 이 결과는 전보(11)에서 발표한 바와 같이 고경도강재의 저속가공시 MQL 가공조건이 건식가공조건보다 절삭분력, 가공거칠기, 공구마모량 등의 절삭특성이 바람직하지 못한 결과와는 상이함을 알 수 있다.

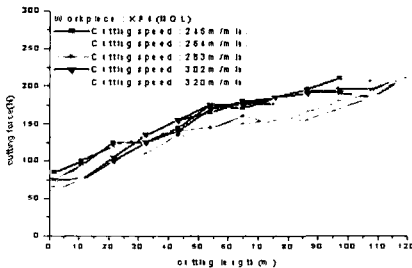
3.1.2 가공환경조건과 가공면 거칠기의 관계

Fig. 5 (a) 및 (b)와 Fig. 6 의 (a) 및 (b)는 각각 KP4 재와 STD11 열처리재를 절삭속도 245~320m/min.의 범위에서 건식 및 MQL 가공조건으로 가공할 때 가공길이의 증가에 따른 가공면 거칠기(Rz)를 나타낸 것이다.

이 결과 KP4 재[HRC32]는 고속가공시, 건식가공조건이 MQL 가공조건보다 절삭가공길이의 변화에 따라 가공면 거칠기가 상당히 나쁨을 알 수 있고, 본 실험에서 행한 절삭속도의 범위 중 절삭

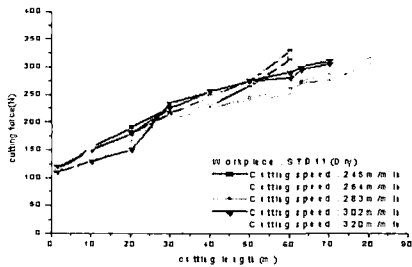


(a) Dry condition

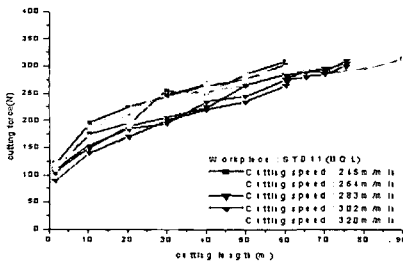


(b) MQL condition

Fig. 3 Comparisons of the cutting force F_z according to the cutting length for the cutting environments in machining the KP4



(a) Dry condition

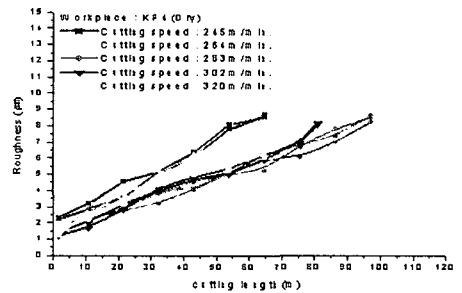


(b) MQL condition

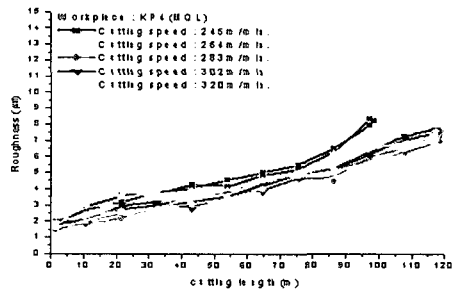
Fig. 4 Comparisons of the cutting force F_z according to the cutting length for the cutting environments in machining the hardened STD11

특성이 우수한 절삭속도 283m/min.에서 이들 값을 비교하면 건식가공시에는 가공길이 약 97.2m 에서 가공면 거칠기(Rz)값이 약 $8.5 \mu\text{m}$ 으로 나타나고, MQL 가공조건에서는 가공길이 약 119.54m 에서 Rz 값이 약 $7.53 \mu\text{m}$ 으로 나타나고 있어서, MQL 가공조건이 건식가공 조건의 가공면 거칠기보다 좋은 결과가 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 STD11 열처리재[HRC60]의 경우에서도 MQL 가공조건이 건식가공보다 가공길이의 변화에 따라 나타나는 Rz 가 바람직하게 나타나고 있으며, 본 실험에서 행한 절삭속도의 범위 중 절삭특성이 가장 좋은 절삭속도 283m/min.에서 건식가공시에는 가공길이 약 80.28m 에서 Rz 값이 약 $3.13 \mu\text{m}$ 으로, MQL 가공시 가공길이 약 89.99m 에서 Rz 값이 약 $3.11 \mu\text{m}$ 으로 나타나고 있다.

한편 본 실험결과 가공면 거칠기는 가공환경 조건에 무관하게 피삭재의 경도가 클수록 좋게 나타나고 있으며, 선행연구결과(11,12,13)와도 일치하고 있다.

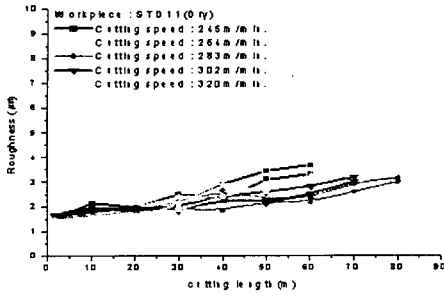


(a) Dry condition

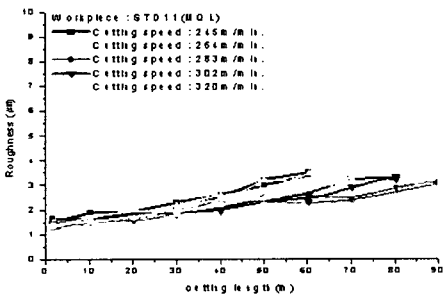


(b) MQL condition

Fig. 5 Comparisons of the roughness (Rz) according to the cutting length for the cutting environments in machining the KP4



(a) Dry condition



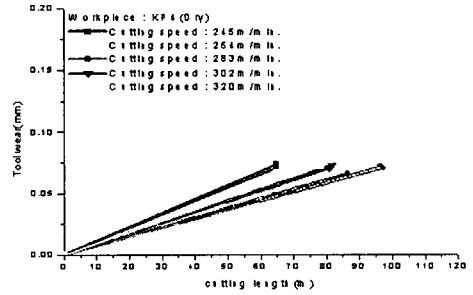
(b) MQL condition

Fig. 6 Comparisons of the roughness (Rz) according to the cutting length for the cutting environments in machining the hardened STD11

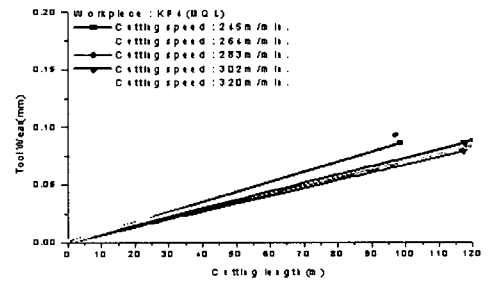
3.1.3 가공환경조건과 공구마모량의 관계

불 엔드밀 가공시 발생하는 공구마모의 형태는 플랭크 마모, 크레이터 마모, 칩핑 등의 형태가 나타나고 있으며, 이들 중 플랭크 마모가 가장 일반적으로 발생하는 것으로 알려져 있으며(14) 본 실험결과 공구에서 발생하는 마모형태가 플랭크 마모가 지배적으로 나타나고 있기 때문에 플랭크 마모량을 중심으로 검토하였다. Fig. 7 및 Fig. 8은 각각 KP4 재 및 STD11 열처리재를 절삭속도 245~320m/min의 범위에서 건식 및 MQL 가공조건에서 불 엔드밀 가공시 가공길이와 공구마모량의 관계를 나타낸 것이다.

이 결과 KP4 재는 절삭특성이 가장 우수한 283m/min.의 절삭속도에서 건식가공시 가공길이 약 97.2m 에서 발생한 공구마모량이 약 0.072mm 인데 비하여 MQL 가공조건에서는 가공길이 약 119.54m 에서 발생한 공구마모량은 약 0.083mm 를 나타내고 있다. 또한 STD11 열처리재의 경우, 절삭속도 283m/min.에서 건식가공시 가공길이 약 80.28m 에서 발생한 공구마모량 약 0.093mm 이고, MQL 가공시 가공길이 약 89.99m 에서 공구마모량

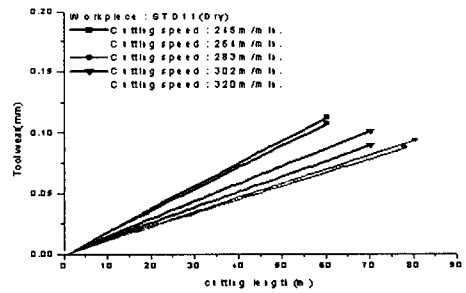


a) Dry condition

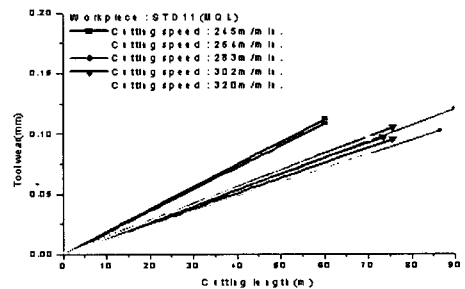


(b) MQL condition

Fig. 7 Variations of the tool wear for the various cutting speeds and the cutting environments of the KP4



(a) Dry condition



(b) MQL condition

Fig. 8 Variations of the tool wear for the various cutting speeds and the cutting environments of the hardened STD11

은 약 0.102 mm 를 나타낸다. 따라서 KP4 재 및 STD11 열처리재 모두 본 실험에서 행한 절삭속도 범위에서는 MQL 가공환경조건이 건식가공조건보다 공구마모가 적게 나타나고 있다.

3.1.4 가공환경조건과 공구수명과의 관계

공구수명에 미치는 절삭조건 영향은 일반적으로 절삭속도, 이송량, 절삭깊이 등의 순서로 나타난다. (15) 본 실험은 절삭깊이 0.2mm 에서 이송량은 KP4 재는 0.2mm/rev., STD11 열처리재는 0.17mm/rev.로 일정하게 하였고, 절삭속도와 가공환경의 변수에 따라 가공시 발생하는 절삭력의 크기, 가공면 거칠기 및 공구 마모량의 관계를 종합적으로 검토하여 가공한계길이를 결정 한 후, 절삭속도와 가공시간의 관계를 Taylor 의 공구수명식 (16)인 $VT^n = C$ 에서 지수 n 값과 상수 C 값을 구하였다.

한편 Fig. 9 및 Fig. 10 은 각각 KP4 재 및 STD11 열처리재를 건식 및 MQL 가공환경조건에서 절삭속도와 공구수명시간과의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과 KP4 재의 경우 건식가공시 $n=0.33587$, $C=910.2$ 의 값을 갖고, MQL 가공시에는 $n=0.33998$, $C=981.7$ 의 값을 갖는다. 또한 STD11 열처리재의 경우 건식가공시 $n=0.73175$, $C=3460.75$ 의 값을 갖고, MQL 가공시 $n=0.29441$, $C=808$ 의 값을 갖는다.

한편 고경도강재의 불 엔드밀 가공시 건식 및 MQL 가공환경이 절삭특성에 미치는 영향을 살펴보면 전보(11)의 경우처럼 절삭깊이가 0.5mm 로 크고, 절삭속도가 35~100m/min.인 저속 가공시에는 공구수명 등 절삭특성이 MQL 가공환경조건이 건식가공시보다 나쁜 결과를 나타내고 있으나 본 실험과 같이 절삭깊이가 0.2mm 로 작고, 245~320m/min.로 절삭속도가 크게 증가한 경우에는 KP4 재 및 STD11 열처리재 모두 MQL 가공조건이 건식가공보다 절삭특성이 비슷하거나 더 바람직한 결과로 나타나고 있고, 이 현상은 중경도 강재인 KP4 재[HRC32]에서 더욱 큰 효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 금형용 강재인 KP4 재(HRC32)와 STD11 열처리재(HRC60)를 TiAlN 코팅초경 불 엔드밀 공구를 사용하여, 절삭깊이는 0.2mm 로 일정

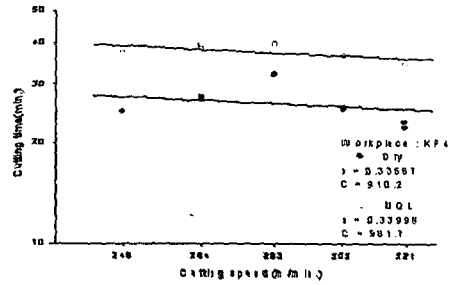


Fig. 9 The relation high cutting speeds and cutting times for the cutting environments of the KP4

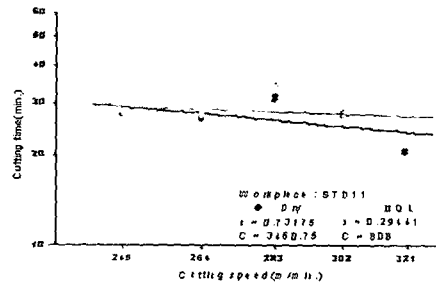


Fig. 10 The relation high cutting speeds and cutting times for the cutting environments of the hardened STD11

하게 하고, 245~320m/min.의 절삭속도 범위에서 건식 및 MQL 가공환경조건이 절삭력, 가공면 거칠기, 공구의 마모 등의 절삭특성에 어떠한 영향을 미치는 가에 대하여 검토하고 다음의 결론을 얻었다.

(1) 불 엔드밀 고속가공시 KP4 재 및 STD11 열처리재 모두 MQL 가공조건이 건식가공조건보다 절삭력, 가공면 거칠기 및 가공길이 등이 절삭특성이 우수하게 나타났다.

(2) 건식 및 MQL 가공 조건 모두 가공면 거칠기는 고경도 강재인 STD11 열처리재가 중경도 강재인 KP4 재 보다 더욱 우수하게 나타나고 있다.

(3) 저속가공과는 달리 고속가공에서는 건식가공보다 MQL 가공이 절삭력 및 가공길이, 가공면 거칠기 등이 우수하게 나타나며 MQL 가공을 하는 것이 더 바람직할 것으로 생각된다.

(4) 가공환경 조건에 의한 Taylor 의 공구수명식 ($VT^n = C$)의 지수 n 값과 상수 C 값은 KP4 재의 경우 건식가공시 $n=0.33587$, $C=910.2$ 이고, MQL 가공시 $n=0.33998$, $C=981.7$ 이며, STD11 열처리재의 경우 건식가공시 $n=0.73175$, $C=3460.75$ 이고, MQL 가공시 $n=0.29441$, $C=808$ 의 값을 갖는다

참 고 문 헌

- (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) M. Bruno etal. "The Performance of Titanium-Nitride Coated HSS Tools", Trans. Of ASME, Vol.101, 1988.7. PP.274~277.
- (3) 이영문의, "TiAlN 코팅 고속도강 공구의 개발 및 공구수명 평가", 한국정밀공학회지, 제 15 권, 제 8 호, 1998.8, PP.33~38.
- (4) R.C.Dewes etal, "The Use of High Speed Machining for the Manufacture of Hardened Steel Dies", Transactions of the NAMRI of SME, Vol.25, 1996, PP.21~26.
- (5) 최상우외, "CBN 볼 엔드밀의 마모 메커니즘에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 12 호, 1997.12, PP. 121~126..
- (6) 모용구외, "환경친화적 기계가공을 위한 기계적 열적측면에서의 절삭유제 사용효과에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제 17 권, 제 7 호, PP. 90~97, 2000.
- (7) 이종항외, "환경 친화적인 절삭가공 기술", 한국정밀공학회, 제 18 권, 제 9 호, PP. 31~36, 2001.
- (8) 김석원외, "난삭성 재료의 가공환경변화에 따른 고속가공 특성평가", (압축공기냉각에 의한 공구수명 평가), 한국공작기계학회지, 제 9 권, 6 호, PP. 21~26, 2000.
- (9) 최헌중외, "압축냉각공기를 이용한 환경친화적 연삭 가공기술", 한국정밀공학회, 제 18 권, 제 9 호, PP. 11~17, 2001.
- (10) S. Kitaura etal, "Dry Cutting Performance of (Al,Ti)N coated Carbide Endmills for High Speed Machining", Tool and TECH., No.2, PP. 4~7, 1999.
- (11) 이영주외, "볼 엔드밀 가공환경조건이 고경도 강재의 절삭특성에 미치는 영향", 한국소성가공학회 2003 년도 추계학술대회 논문집, PP. 245~250, 2003.10.
- (12) 원시태외 "볼 엔드밀 가공에서 고경도 강재의 절삭특성에 관한 연구", 한국소성가공학회 2002 년도 금형가공 심포지움, PP.11~18, 2002.2
- (13) 이영주외, "볼 엔드밀 옆날 여유각이 고경도 강재의 절삭특성에 미치는 영향", 한국소성가공학회 추계 학술대회 논문집, PP.211~216, 2002.10.
- (14) 이정길외, "고속용 엔드밀의 성능평가에 관한 연구", 한국정밀공학회, 추계학술대회 논문집, 2000, PP.833~837.
- (15) N. H. Cook, "Tool Wear and Tool Life", J. of Engineering for Industry, Trams. of ASME, 1973, PP. 931~938.
- (16) 양민양 저, 절삭가공 (이론과 실제) , 청문각, 1997, PP. 41~54, P. 93.