

## 볼 엔드밀 가공환경 조건이 고경도 강재의 절삭 특성에 미치는 영향

이영주\* · 원시태\*\*

(2003년 10월 9일 접수)

### Effect of Ball End Mill Cutting Environments on Machinability of Hardened Tool Steel

Y. J. Lee and S. T. Won

#### Abstract

This research conducted milling tests to study effects of cutting environment conditions of ball end mills on the characteristics of hard milling 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 were conducted and MQL(Minimum Quantity Lubricant) device was used to spray coolant. Cutting forces, tool wear and surface roughness were measured in the cutting tests. Results showed that dry cutting of KP4 and hardened STD11 specimens produced better surface quality and wear performance than MQL spray cutting did.

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

#### 1. 서론

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<sup>(1-4)</sup> 가혹한 절삭조건에 의한 공구의 마모가 큰 문제점으로 나타나고 있으며 아직도 이들 재료의 절삭가공시 가공 메카니즘이 명확하게 규명되어 있지 않은 실정이다.<sup>(5-6)</sup>

한편 절삭가공시에는 칩의 원활한 배출과 절삭

열의 효과적인 제거를 위해 절삭유를 사용하여 왔으나<sup>(7)</sup>, 비산, 누설, 악취등의 작업환경의 악화와 함께 윤활성능의 향상을 위한 극압첨가제(염소, 유황, 인 등)의 사용은 많은 유해물질을 발생시키는 것으로 보고 되고 있다.<sup>(8)</sup>

따라서 선진국에서는 작업환경에 대한 규제가 강화됨에 따라 최근에는 환경 친화적인 공작기계의 개발과 함께 환경 친화적인 절삭유 및 절삭유 처리기술의 개발에 의한 절삭유 사용 시간의 증가에 대한 연구 및 절삭유를 효율적으로 공급하여 공구수명을 향상시키고, 가공 정밀도를 높이기

\* 서울산업대학교 산업대학원 정밀기계공학과  
(현 인건인력개발원 메카트로닉스과)  
\*\* 서울산업대학교 금형설계학과, 정밀기계기술연구소

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 절삭유(Minimum quantity lubrication, MQL)에 의한 세미건식가공(Semi dry cutting)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(9-11)</sup>

따라서 본 연구는 볼 엔드밀 가공시 가공환경 조건이 고경도 강재의 절삭특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 대표적인 금형강재인 KP4재와 STD11 열처리재를 TiAlN코팅 초경 볼 엔드밀 공구를 사용하여 건식 및 극미량 절삭유 공급에 의한 세미건식가공을 실시하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 피절삭 재료

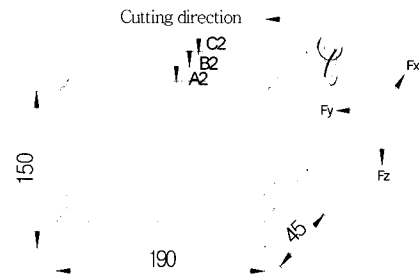
본 실험에 사용한 피절삭 재료는 대표적 금형용 강재중 비열처리 강재인 KP4재와 열처리 강재인 냉간 합금 공구강 STD11재를 선정하였다. Table 1은 이들 재료의 화학적 성분과 기계적 성질을 나타낸 것이고, Fig. 1은 절삭특성을 검토하기 위한 시험편 형상과 크기를 나타낸 것이다.

**Table 1 Chemical composition and mechanical properties of workpieces**

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

### 2.2 볼 엔드밀공구

본 실험에서 사용한 볼 엔드밀은 지름 12mm, 경사각 10° 및 여유각 9°를 갖는 WC-Co 성분의 초경합금에 PVD에 의한 TiAlN 코팅처리(HV3500)를 하였다.



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

### 2.3 실험장치의 구성

본 실험에서 사용한 공작기계는 머시닝센터(현대중공업, FZ25, 6000rpm)를 이용하였고, 절삭력의 측정을 위하여 압전형 공구동력계(Kistler 9257 B)를 머시닝센터 베드에 설치하고, 바이스를 이용하여 공작물을 고정하였다.

공구동력계에서 얻어진 신호는 다채널 증폭기(Kistler 5019 A)로 증폭되었고, 이 증폭된 신호는 아날로그-디지털 변환기(Data translation, INC DT3001)를 거쳐 디지털화 되어 컴퓨터로 전송된 후 컴퓨터에서는 Cutting force software (HP VEE)를 사용하여 데이터를 분석하였다. 한편 가공환경 조건은 건식가공과 함께 극미량 절삭유 장치에 의한 세미건식가공을 하였다. Table 2는 MQL장치에 의한 절삭유 분사조건을 Fig. 2는 MQL장치의 구성도를 나타낸 것이다. Fig. 3은 절삭력 측정시스템의 개략도를 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

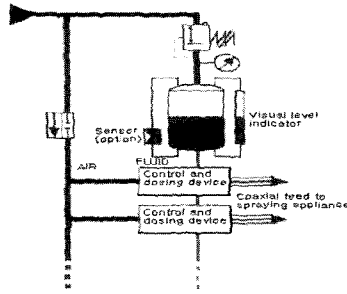


Fig. 2 Schematic diagram of minimum quantity lubrication system

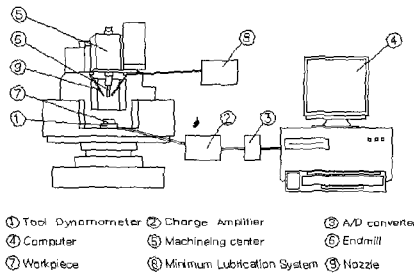


Fig. 3 Schematic diagram of experiment set-up to measure cutting force

### 2.4 절삭작업조건

절삭조건 선정은 건식 및 저속가공조건에서 절삭깊이를 0.5mm로 실시한 선행 연구결과<sup>(12-13)</sup> KP4재는 절삭속도 85m/min, 이송량 0.26mm/rev이, STD11 열처리재는 절삭속도 30m/min, 이송량 0.17 mm/rev조건이 가장 바람직한 것으로 나타난 바 있어, 본 실험에서는 이들 연구 결과를 토대로 하여 절삭속도, 이송량 및 절삭깊이의 조건은 Table 3과 같이 하였다.

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

Cutting condition	*Cutting Speed (m/min)	Feed per Revolution (mm/rev)	Feed Rate (mm/min)	Cutting Depth (mm)	
Work Pieces	KP4	85	0.26	586	0.5
		100	0.26	690	
Hardened	STD11	30	0.17	135	
		35	0.17	162	

### 2.5 절삭분력 측정방법

공구 수명과 절삭력의 관계를 도출하기 위해서는 공구수명이 다할 때까지 공구의 멈춤이 없이 계속적인 가공이 되어야 하지만 본 실험에서 사용한 공구 동력계의 측정 범위는(170×100mm)이므로 피삭재의 한면 한면을 반복적으로 가공하였다. 한편 가공 중 발생하는 절삭 3분력(Fx, Fy, Fz)의 측정은 Fig.1과 같이 가공한 면당 3지점 [A(5줄) B(17줄) C(30줄)] 에서 정상 상태의 가공이 이루어지는 중간 위치인 A2, B2, C2에서 측정하였고, 본 실험에서는 측정된 절삭의 3분력 중 가장 크게 나타나는 분력(Fz)의 크기가 KP4재의 경우에는 약 400~500N, STD11 열처리재의 경우에는 약 450~500N의 범위에 도달하면 가공을 중지하였다.

### 2.6 가공면 거칠기의 측정방법

가공면의 거칠기의 측정은 촉침식 표면조도계 [Model:M4pi, Range of indication:0.002~50.0µm, Cut off value:480(nm)] 를 이용하여, 한 면의 절삭가공이 완료된 후 Fig. 1의 절삭력 측정위치 (A2, B2, C2)에서 10점 평균거칠기 (Rz)값을 측정하였다.

### 2.7 공구마모의 측정방법

볼 엔드밀 공구의 마모현상과 마모량의 측정은 빛과 레이저를 투사하여 나타나는 그림자와 반사된 시간차를 이용하여 공구형상과 각 부의 치수를 측정할 수 있는 공구만능측정기 [Model:Helich-ek RAL 7035, X, Y, Z stroke:200 350 250(mm)] 를 이용하였고, 본 실험에서는 가공 중 볼 엔드밀 공구에서 발생한 마모량이 KP4재는 0.2~0.3mm, STD11열처리재의 경우 0.08~0.18mm 정도 발생하면 가공을 중단하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 가공환경조건과 절삭분력의 관계

Fig. 4(a), (b)는 KP4재를 각각 절삭속도 85 및 100m/min에서 건식 및 극미량 절삭유 공급에 의한 조건으로 가공하는 경우 가공깊이의 증가에 따라 발생한 절삭분력(Fz)을 나타낸 것이다. 이 결과 KP4재는 건식 및 MQL에 의한 세미건식 가공 시 가공깊이와 절삭분력은 큰 차이가 나타나지 않음을 볼 수 있어서 이들 가공환경조건에 의한

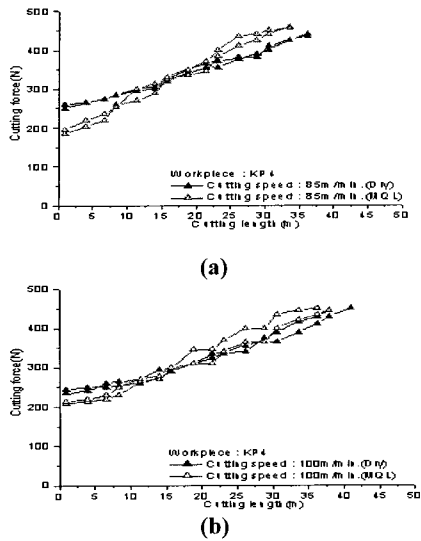


Fig. 4 Comparisons of the cutting forces  $F_z$  according to the cutting length for the cutting Environments in machining the KP4 (Dry & MQL)

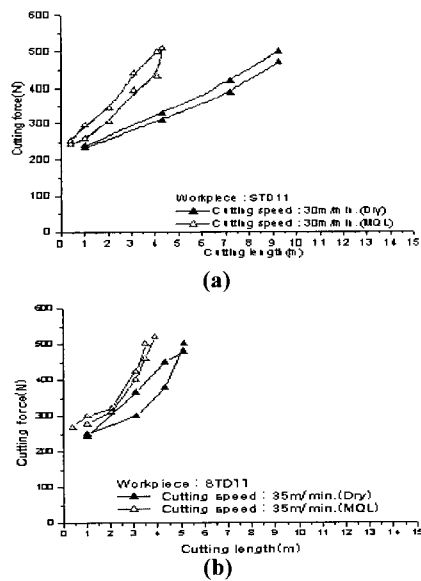


Fig. 5 Variations of the cutting forces  $F_z$  according to the cutting length for the cutting environments in machining the hardened STD11 (Dry & MQL)

영향은 크지 않음을 알 수 있다.

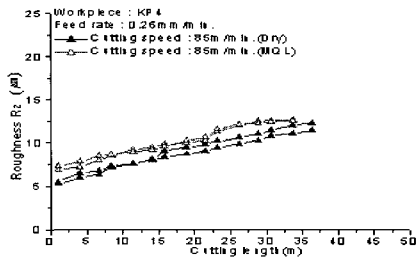
한편 Fig. 5(a), (b)는 STD11 열처리재를 각각 절삭속도 30 및 35m/min에서 건식 및 극미량 절삭유공급에 의한 조건으로 가공 길이의 증가에

따라 발생한 절삭분력( $F_z$ )을 나타낸 것이다. 이 결과 STD11 열처리재는 건식가공의 경우가 MQL에 의한 가공조건보다 동일한 절삭길에서 발생하는 절삭분력( $F_z$ )이 작게 나타나며 가공길이도 길게 나타나고 있어서 건식가공보다 오히려 MQL에 의한 가공이 바람직하지 않은 것으로 나타난다. 이 결과는 김석원<sup>(9)</sup> 등이 난삭재의 절삭가공에서는 절삭속도가 증가할수록 공구의 수명은 상대적으로 감소하며, 특히 볼 엔드밀 가공과 같은 단속절삭에서는 저속가공시 발생하는 절삭분력에 의한 충격과 절삭유제에 의한 냉각 때문에 발생하는 열적 충격이 주기적으로 절삭날에 작용하기 때문에 응력집중에 의하여 박리현상이 발생한다고 한 결과와 일치하고 있다.

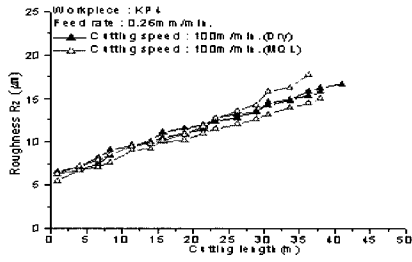
### 3.2 가공환경조건과 가공면 거칠기의 관계

Fig. 6(a) 및 (b)는 KP4재를 각각 절삭속도 85 및 100m/min에서 건식과 극미량 절삭유 공급에 의한 가공시 가공길이의 증가에 따른 가공면 거칠기( $R_z$ )의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과 KP4재는 이들 가공 환경조건에서 모두 가공 길이의 증가에 따라 나타나는 가공면 거칠기의 크기는 비슷하게 나타난다. 따라서 KP4재에서는 건식 및 극미량 절삭유공급의 가공조건이 가공면 거칠기에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 7(a) 및 (b)는 STD11 열처리재를 각각 절삭속도 30 및 35m/min에서 건식과 극미량 절삭유 공급조건으로 가공할 때 가공길이의 증가에 따른 가공면 거칠기( $R_z$ )의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과 절삭속도의 크기에 따라 가공한계길이의 차이는 나타나고 있지만, STD11 열처리재의 가공면 거칠기( $R_z$ )는 두 가공환경조건 모두 약  $4.5\mu\text{m}$  미만으로 KP4재의 가공한계길에서 나타나는  $R_z$  값인 약  $16.5\mu\text{m}$ 에 비하여 작다. 이 결과는 선행 연구 결과<sup>(12-13)</sup>와 같이 볼 엔드밀 가공시 나타나는 가공면 거칠기는 고경도 재료일수록 우수함을 알 수 있다.

한편 STD11 열처리재의 가공면 거칠기에 미치는 가공 환경조건을 살펴보면 Fig. 7에서 보는 바와 같이 극미량 절삭유에 의한 가공이 건식가공 조건보다 가공한계길이 및 가공면 거칠기가 개선되지 못하고 특히 30m/min의 절삭속도에서는 현저히 나쁜 결과가 나타나고 있다. 이 결과는 본 실험에서 사용한 극미량 절삭유 공급 장치는 절삭점을 직접 냉각시키기 보다는 2차적으로 발생되

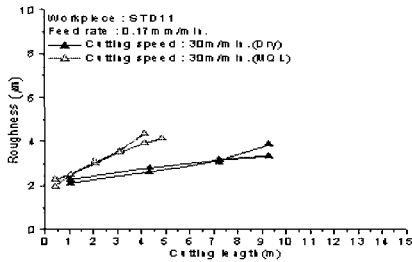


(a)

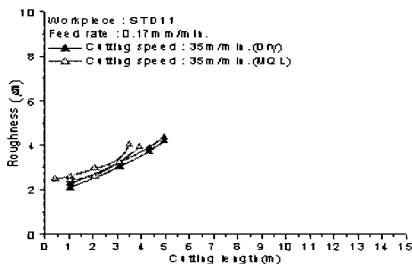


(b)

Fig. 6 Comparisons of the Rz according to the cutting length for the cutting environments of the KP4 (Dry & MQL)



(a)



(b)

Fig. 7 Comparisons of the Rz according to the cutting length for the cutting environments of the hardened STD11 (Dry & MQL)

는 공구와 칩 사이의 마찰열을 감소시켜 가공면 거칠기를 향상 시킬 목적으로 개발<sup>(8)</sup>된 접윤 고려할 때 본 실험과 같이 고경도 재료를 절삭깊이가 0.5mm로 상당히 크고, 특히 저속가공시에는 극미량 절삭유 공급 장치에 의한 가공이 바람직하지 못하며 이 장치를 이용하는 경우에는 절삭깊이가 작고, 본 실험보다 절삭속도가 매우 높은 고속가공에서의 검토가 바람직할 것으로 생각되며 이와 관련하여 연구가 진행 중에 있다.

### 3.3 가공환경조건과 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.<sup>(14)</sup> 본 실험의 경우에도 공구에 발생하는 마모형태는 플랭크 마모가 지배적으로 나타나기 때문에 플랭크 마모를 중심으로 검토하였다.

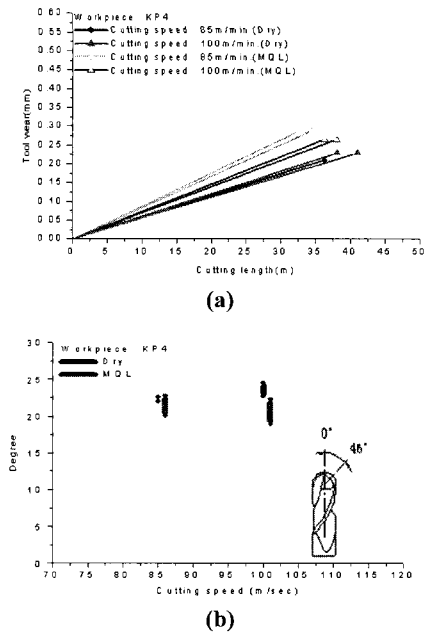
Fig. 8(a)는 KP4재를 절삭속도 85 및 100m/min에서 건식 및 극미량 절삭유 공급조건으로 가공하는 경우 가공길이와 공구 마모량을 나타낸 것이며, Fig. 8(b)는 절삭속도의 크기와 가공한계 길이에서 나타난 공구마모가 발생한 각도를 나타낸 것이다. 이 결과 KP4재는 동일한 절삭 속도의 가공길이에서 발생한 공구마모량은 건식 및 극미량 절삭유에 의한 가공환경 조건의 차이에 의한 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있다. 또한 공구의 마모가 발생하는 각도를 살펴본 결과 본 실험의 절삭속도에서는 가공환경의 차이에 무관하게 약 18°~24°의 범위에서 나타나고 있다. 이 현상은 절삭깊이가 0.5mm이기 때문에 볼 엔드밀과 피삭재의 가공 접촉 각도인 약 23.6°에서 마모가 가장 심하게 나타나는 것으로 생각된다.

한편 Fig. 9(a)는 STD11열처리재를 절삭속도 30 및 35m/min에서 건식 및 극미량 절삭유 공급 조건으로 가공하는 경우 가공길이와 공구 마모량을 나타낸 것이며, Fig.9 (b)는 절삭속도의 크기와 가공한계 길이에서 나타난 공구마모가 발생한 각도를 나타낸 것이다.

이 결과 STD11열처리재는 건식가공의 조건이 극미량 절삭유 공급에 의한 가공조건인 경우보다 가공길이에 대하여 발생하는 공구 마모량의 관점에서 우수하게 나타나고 있으며, 특히 절삭속도 30m/min의 건식가공에서 공구의 마모가 가장 적

었다.

또한 공구의 마모가 발생하는 각도는 두 가공 환경 조건 모두 절삭속도 30m/min에서는 약4°~21°의 범위에서 절삭속도 35m/min에서는 18°~23°의 범위에서 나타나고 있어 STD11열처리재의 경우에도 절삭속도의 크기와 함께 절삭깊이 0.5mm에 의한 불 엔드밀과 피삭재의 가공접촉 각도인 약 23.6°의 영향이 나타나는 것으로 생각된다.



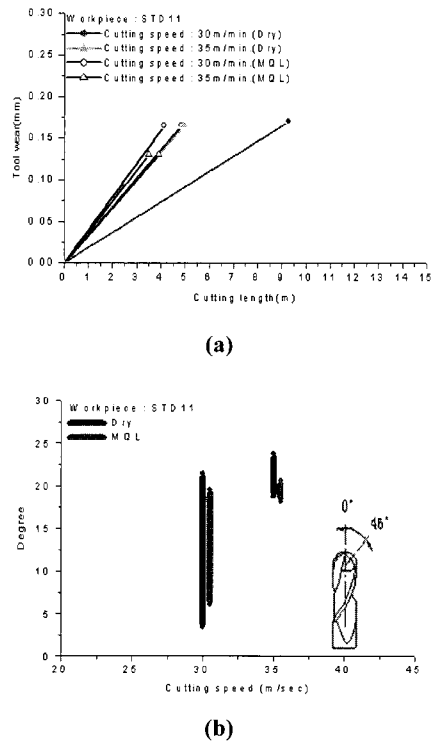
**Fig. 8 (a) Variatons of the tool wear for the various cutting speeds in machining the KP4(Dry & MQL) (b) The relation between tool wear occurrence degrees and cutting speeds for the cutting environments of the KP4 (Dry & MQL)**

3.4 가공환경조건과 공구수명과의 관계

공구수명에 미치는 절삭조건 영향은 일반적으로 절삭속도, 이송량, 절삭깊이의 순서로 나타나며<sup>(15)</sup>, 본 실험의 경우 절삭깊이는 0.5mm, 이송량은 KP4재는 0.26mm/rev, STD11 열처리재는 0.17mm/rev로 일정하게 하였고, 절삭속도와 가공환경의 변수에 따라 불 엔드밀 가공시 발생하는 절삭력의 크기, 가공면 거칠기 및 공구 마모량의 관계를 종합적으로 검토하여 가공한계길이를 결정 한 후 피삭재의 종류에 따른 절삭속도와 가공시간의 관계를 Taylor의 공구수명식<sup>(16)</sup>인  $VT^n = C$

에서 지수 n값과 상수 C값을 구하였다.

한편 Fig. 10(a) 및 (b)는 각각 KP4재 및 STD11 열처리재의 불 엔드밀 가공시 절삭속도와 공구수명 시간과의 관계를 나타낸 것으로 KP4재는 건식가공시 n=1.395, C=27579의 값을 갖고, MQL가공시에는 n=1.592, C=55324의 값을 갖는다. 또한 STD11 열처리재는 건식가공시 n=0.179, C=64의 값을 갖고, MQL가공시에는 n=0.365, C=108의 값을 갖는다. 한편 이들 피삭재에 미치는 건식 및 극미량 절삭유에 의한 가공환경의 영향은 절삭깊이가 크고 저속가공시에는 중경도강재인 KP4재보다는 고경도강재인 STD11 열처리재가 더욱 큰 영향을 받고 있으며 극미량 절삭유 가공환경이 더욱 나쁜 결과를 갖음을 알 수 있다.



**Fig. 9 (a) Variatons of the tool wear for the various cutting speeds in machining the hardened STD11 (Dry & MQL) (b) The relation between tool wear occurrence degrees and cutting speeds for the cutting environments of the hardened STD11 (Dry & MQL)**

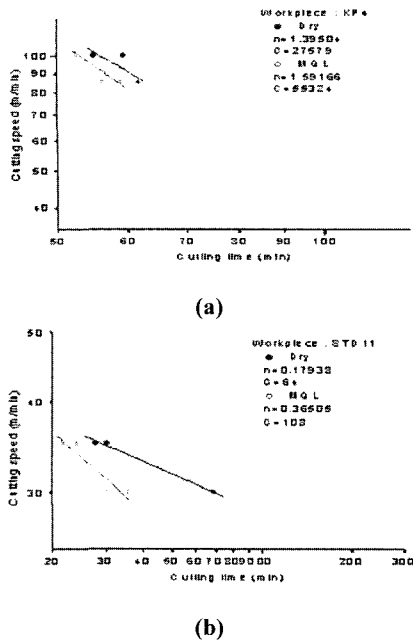


Fig. 10 The relation between cutting speeds and cutting times for the cutting environments of the (a) KP4 (Dry & MQL) and (b) hardened STD11 (Dry & MQL)

#### 4. 결론

본 연구는 대표적인 금형용 강재인 KP4재 [HRC32]와 STD 열처리재[HRC60]를 TiAlN코팅 초경 불 엔드밀 공구를 이용하여 가공시 건식 및 극미량 절삭유 공급에 의한 가공환경조건이 절삭 특성에 미치는 영향을 검토하고 다음의 결론을 얻었다.

(1) KP4재는 건식가공에 의한 가공면 거칠기 및 공구 마모량등의 절삭특성이 극미량 절삭유 공급에 의한 가공조건보다 약간 우수하게 나타났으나, 고경도 강재인 STD 11 열처리재는 건식가공에 의한 이들 절삭특성이 극미량 절삭유공급에 의한 가공조건보다 매우 우수한 것으로 나타났다.

(2) KP4재 및 STD11 열처리재 모두 공구의 마모가 발생한 위치는 가공환경 조건에 무관하게 불 엔드밀의 측면 절삭날의 약 18°~25°의 범위에서 발생하고 있고, 이 현상은 본 실험의 경우 절삭깊이가 0.5mm이기 때문에 불 엔드밀과 피삭재의 이론적인 가공접촉 각도인 23.6° 부근에서 마모가 심하게 나타나는 것으로 생각된다.

(3) 가공환경 조건에 의한 Taylor의 공구수명식( $VT^n = C$ )의 지수  $n$ 값과 상수  $C$ 값은 KP4재는 건식가공의 경우  $n=1.395$ ,  $C=27579$ 이고, 극미량 절삭유 분사 가공시  $n=1.592$ ,  $C=55324$ 의 값을 갖고, STD11 열처리재는 건식가공의 경우  $n=0.179$ ,  $C=64$ 이고, 극미량 절삭유 분사 가공시  $n=0.365$ ,  $C=108$ 의 값을 갖는다. 특히 고경도 강재의 불 엔드밀 가공시 절삭깊이가 크고 저속가공인 경우에는 극미량 절삭유 분사 가공조건보다 건식가공이 더 바람직한 것으로 생각된다.

#### 참고 문헌

- (1) Lee. D. W., 2000. 6, "High Speed Ball End Milling for Difficult-to-cut Materials", Proceedings of the International Machine Tool Technical Seminar, Seoul, Korea, pp. 21~26.
- (2) T. Majiama., 1995, "Development of ultra high speed milling machine", proceeding 6th International Machine Tools Engineering, Osaka, Japan, pp. 61~83.
- (3) M. Bruno et al., 1988.7, "The Performance of Titanium-Nitride Coated HSS Tools", Trans. of ASME, Vol. 101, pp. 274~277.
- (4) 이영문의., 1998. 8, "TiAlN코팅 고속도강 공구의 개발 및 공구수명 평가", 한국정밀공학학회지, 제15권, 제8호, pp. 33~38.
- (5) R. C. Dewes et al., 1996, "The Use of High Speed Machining for the Manufacture of Hardened Steel Dies.", Transactions of the NAMRI of SME, Vol.25, pp. 21~26.
- (6) 최상우외., 1997.12, "CBN 불 엔드밀의 마모 메커니즘에 관한 연구", 한국정밀공학학회지, 제14권, 제12호, pp. 121~126.
- (7) 모용구의., 2000, "환경친화적 기계가공을 위한 기계적·열적측면에서의 절삭유제 사용효과에 관한 연구", 한국정밀공학학회지, 제17권, 제7호, pp. 90~97.
- (8) 이종항외., 2001, "환경 친화적인 절삭가공기술", 한국정밀공학학회지, 제18권, 제9호, pp. 31~36.
- (9) 김석원외., 2000, "난삭성 재료의 가공환경변화에 따른 고속가공 특성평가", (압축공기냉각에 의한 공구수명 평가), 한국공작기계학회지, 제9권, 6호, pp. 21~26.
- (10) 최현중외., 2001, "압축냉각공기를 이용한 환경

- 친화적 연삭 가공기술", 한국정밀공학학회지, 제18권, 제9호, pp. 11~17.
- (11) S. Kitaura et al., 1999, "Dry Cutting Performance of (Al, Ti)N coated Carbide Endmills for High Speed Machining", Tool and TECH., No.2, pp. 4~7.
- (12) 원시대외., 2002.2, "볼 엔드밀 가공에서 고경도 강재의 절삭 특성에 관한 연구" 한국소성가공학회 금형가공심포지움, pp. 11~18.
- (13) 이영주외., 2002.10, "볼 엔드밀 옆날 여유각이 고경도 강재의 절삭특성에 미치는 영향", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 211~216.
- (14) 이정길외., 2000, "고속용 엔드밀의 성능평가에 관한 연구", 한국정밀공학학회, 추계학술대회 논문집, pp. 833~837.
- (15) N. H. Cook., 1973, "Tool Wear and Tool Life", J. of Engineering for Industry, Trans. of ASME, pp. 931~938.
- (16) 양민양 저., 1997, "절삭가공"(이론과 실제), 청문각, pp. 41~54, p. 93.