

## 밀링 공구의 코팅 조건이 절삭력 증가율에 미치는 영향

### The effect of coating condition of milling cutter on cutting force increase rate

문창성, 김준현(국민대 자동차전문대학원), 최석우(기술표준원), 김주현(국민대 기계자동차공학부)

#### Abstract

Recently, coated milling cutters are widely used for improving the productivity of cutting processes through high speed cutting and longer tool life. In metal cutting, cutting force increase rate is important factor to diagnose the cutting conditions because the amount of tool wear directly influences the cutting forces. As the cutting length increases, the worn cutter increases the cutting forces. In this study, the effect of coating process of end milling cutter on the cutting performance, especially on the cutting force increase rate, is investigated. The results acquired through the cutting test measuring cutting force increase rate show that not only the injection quantity of  $N_2$  and  $Ar$  but also mean temperature influence the cutting force increase rate during the end milling process.

**Keywords** : milling process(밀링 작업), milling cutter(밀링 커터), coating process(피복 작업), cutting force increase rate(절삭력 증가율)

#### 1. 서론

공구의 회전과 공작물의 이송으로 다양한 가공을 할 수 있는 엔드밀 가공은 CNC 밀링 머신에서 금형을 가공하는데 많이 이용된다. 이러한 엔드밀 가공 시 절삭력이 증가되면서 공구의 마모 및 파손, 공구 수명 저하와 같은 이상상태가 발생되어 금형의 정밀도, 생산성, 경제성을 저하시킨다. 따라서 절삭가공 과정에서 발생하는 여러 가지 이상상태를 검출 및 분석함에 있어 절삭력 증가율은 여러 가지 절삭 현상들을 가장 폭넓게 내포하고 있으므로 언제나 필수적인 연구 대상이 되어왔다.

1980년대 후반부터는 이러한 단점을 보완하기 위한 새로운 공구코팅 공정들이 개발되기 시작하였는데, 그 중에 하나가 이온 플레이팅(ion plating)이다. 이 기술은 선진 외국에서는 1960년대 중반 이후 진공을 이용하여 불순물의 혼입을 방지하면서 우수한 특성을 가진 박막을 제조할 수 있다는 것이 알려졌고, 이후부터 플라즈마를 응용한 표면 개질 방법에 대하여 많은 연구가 수행되었다.<sup>1)2)</sup>

특히 절삭 공구의 절삭날 부분의 표면 처리와 코팅은 독일의 Bideoyer사가 1969년에 화학적 증착법(chemical vapor deposition: CVD)에 의해

시도되어 처음으로 코팅 공구를 시판하였다.

CVD는 열 CVD와 플라즈마 CVD를 들 수 있는데, 열 CVD법은 저온에서 기화한 휘발성의 금속화합물질과 고온에 가열된 모재와의 접촉에 의한 반응이 기초가 되어 목적하는 금속화합물을 모재 표면에 석출시키는 방법이고, 플라즈마 CVD는 열 CVD의 결점을 보완하기 위해 저온화 처리를 위한 저온 플라즈마 CVD가 개발되었는데, 이것은 저온 플라즈마를 이용해서 그 반응성을 저온에서 증대시키려고 하는 것이다.

물리적 증착법(physical vapor deposition: PVD)은 코팅층의 순도, 조직, 그리고 코팅층과 모재간의 밀착력 조절이 매우 용이하며 최근에 문제시되고 있는 공해 발생 문제가 전혀 없다는 장점도 있다. 단점은 막의 균일성이 좋지 않고, 낮은 모서리 도포성(step coverage), 이온 충돌에 의한 높은 압축 잔류 응력의 발생, 낮은 접착력과 생산성을 가지는 것이다.<sup>3)</sup>

PVD 기술은 코팅 목적에 따라 방법상의 선택 결정이 이루어져야 한다. 예를 들면, 진공증착법은 빠른 증착 속도로 코팅할 수 있으며 스퍼터링법은 코팅층 합금 조성 조절이 용이하고,<sup>4)5)</sup> 이온 플레이팅법으로는 매우 우수한 밀착력을 얻을 수 있다.<sup>6)</sup> 결국, PVD에 의한 고속도강, 초경합금 등도 코팅되어 실용화되었는데,<sup>7)</sup> 최근까지도 코팅 공구의 개발을 위해 고경도와 우수한 인성을 동시에 갖춘 금속 재료를 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행됨에 따라 이에 인성을 먼저 부여한 후, 재료 표면을 코팅하여 사용 목적에 부합시키려 하고 있다. 이들 코팅 박막의 재료로는 티타늄 질화물, 티타늄 탄화물 그리고 세라믹 등이 보편적으로 사용되고 있다.

국내에서는 코팅 공정중의 챔버 내부 온도와 성장 박막과의 관계에 대한 연구와<sup>8)</sup> 박막성에 대한 연구<sup>9)</sup>등 수많은 연구가 이루어져 왔으나, 아직까지도 공구에 적용되는 코팅 피막의 물성은 습식 도금보다 안정적이질 못하다. 그 이유는 온도, 진공도, 가스 주입량, 바이어스 등의 여러 인자가 박막의 성능에 영향을 주기 때문이며<sup>10)</sup>, 박막 형성 중의 비평형 상태로 인해 큰 잔류 응력, 높은 결함 농도, 미세한 결정립 크기, 우선방위의 발달, 준안정상(metastable phase), 미소 공극(pin

hole), 불순물 등으로 인하여 여러 가지 미소 구조상의 변화가 있다는 연구가 보고되었다.<sup>11)</sup>

본 연구의 목적은 박막의 성능에 지대한 영향을 주는 인자 중  $N_2$ 와  $Ar$  가스 주입량, 온도를 변화시켜 코팅한 밀링 공구로 절삭 가공하여 가공 시에 모니터링 되는 절삭력을 비교 분석하였을 때, 코팅 조건이 절삭력 증가율에 미치는 영향에 대하여 알아보는 것이다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

엔드밀 작업을 통하여 절삭력을 측정하여 코팅 공구의 성능을 알아보기 위하여 본 실험에서는 Table 1과 같은 장치를 사용하였다. 절삭길이 증가함에 따라 절삭력을 측정하여 절삭력 증가율을 알아낼 수 있다.

Table 1. Instrument and specification

Instrument	Company	Specification
Machining Center	HWACHEON	SIRIUS-2 CNC
Software	ADVANTECH	LabVIEW
Dynamometer	KISTLER	9257B
Charge Amplifier	KISTLER	5019A130

### 2.2 절삭공구

본 실험에 사용된 밀링 공구는 고속도공구강에 TiN 코팅된 한국OSG사의 Ø8 두 날 엔드밀을 사용하였는데 코팅 시  $N_2$ 와  $Ar$  가스 주입량, 온도를 변화시켰다. 4날 엔드밀은 전처리가 쉽지 않고 코팅 시 엔드밀이 자전을 하기는 하지만, 섀도잉(shadowing)현상으로 인해 코팅층의 균질도가 떨어지게 되므로, 코팅된 엔드밀의 성능을 정확하게 판단하기 위해 간섭이 적은 2날 엔드밀을 이용하기로 하였다.

Table 2. Component of SKD-56

Component	Content(%)
C	0.85 ~ 0.95
Si	less than 0.4
Mn	less than 0.4
P	less than 0.030
S	less than 0.030
Cr	3.80 ~ 4.50
Mo	4.60 ~ 5.30
W	5.70 ~ 6.70
V	1.70 ~ 2.20
Co	7.00 ~ 8.00

엔드밀의 소재는 SKD-56으로 성분은 Table 2와 같은 고속도강이다. 타겟 재료인 Ti는 금속 봉 형태로 순도가 99.8%인 재료를 사용하였고, 한번의 코팅에 필요한 크기는 지름이 약 40mm, 높이가 약 10mm정도가 되도록 금속봉을 절단하여 사용하였다.

### 2.3 실험용 피삭재

본 실험에 사용한 재료는 STS 304를 사용하였다. STS 304 시편은 밀링커터로 거친면을 절삭한 후에 연삭기로 절삭한 면을 다듬어서 50×400×200의 치수로 제작하였다.

### 2.4 실험 방법

먼저  $N_2$ 와  $Ar$  가스 주입량, 온도를 변화시켜 코팅한 Ø8 두 날 엔드밀로 절삭길이를 3000mm 까지 절삭 할 수 있도록 머시닝 센터에 프로그램을 입력하여 가공하였다. 입력한 프로그램에 의해 절삭 행정을 하면 절삭력은 KISTLER사의 공구동력계를 통하여 Charge Amplifier에 신호로서 전달된다. 신호가 증폭되어 A/D 변환기를 통해서 데이터가 IBM PC에 저장된다. 각 실험은  $N_2$ ,  $Ar$ , 온도의 조건을 변화시켜 수행하였으며 절삭이 진행됨에 따라 절삭력을 측정하였다.

본 실험에 적용된 절삭조건은 Table 3과 같으며 반복 실험을 위하여 머시닝센터에 프로그램

Table 3. Cutting condition

Cutter Diameter (mm)	8
Spindle Speed (rpm)	1500
Depth of cut (mm)	12
Width of Cut (mm)	0.5

으로 입력시켰다. 실험에 사용된 절삭조건에서 절삭속도는 37m/min으로 계산된다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 엔드밀의 코팅층 두께

Fig. 1 ~ 3에 나타나 있는 사진은 코팅된 공구의 단면을 나타낸 사진이다. Fig. 1은 저전압인 200V, Fig. 2는 정상 상태인 370V, Fig. 3은 고전압인 600V에서 코팅한 엔드밀을 SEM으로 5,000배 확대하여 코팅층의 두께를 찍은 사진이다. 사진에서 짙은 좌측은 측정물을 예폭시로 물딩했을 때의 예폭시 층이고 가운데 부분이 실제 코팅층, 우측 부분이 모재인 엔드밀이다. 전압이 높을수록 코팅층이 두꺼워지는 것을 사진을 통하여 명확히 알 수 있다.

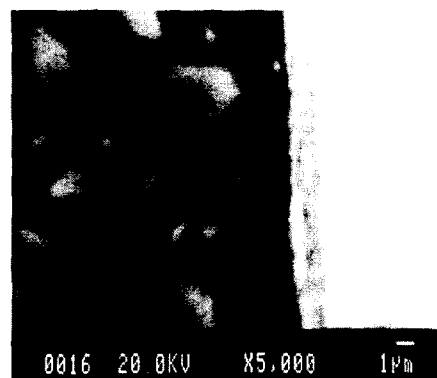


Fig. 1 Coating film thickness (bias 200V)

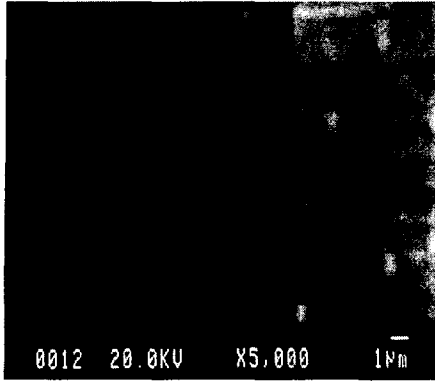


Fig. 2 Coating film thickness  
(bias 370V)

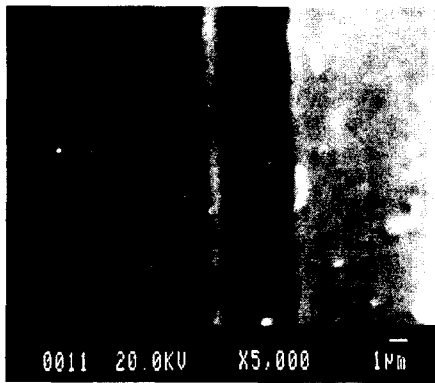


Fig. 3 Coating film thickness  
(bias 600V)

### 3.2 코팅 조건에 따른 절삭력 증가율

본 실험에 사용된 코팅 밀링 공구의 정상 상태에서의 최적 코팅조건은 Table 4와 같다. 코팅은 이온빔으로 이온화율을 높일 수 있도록 고안된 중공음극방전관을 사용한 장비를 이용하였다. 엔드밀 모체에 부착된 오염물을 알칼리 용액 등으로 제거하고 건조 과정을 거쳐 곧바로 코팅 챔버에 투입시켰다. 이는 표면의 오염물이 완전히 제거되면 금속 표면의 산화가 급격히 발생되기 때문에 코팅층의 안정을 위하여 필수적인 조건이다.

Table 4. Coating parameters of normal condition

Item	Value
Average $N_2$ gas flow	90 ccm
Average $Ar$ gas flow	30 ccm
Mean temperature of end-mill	490 °C
Average bias(V)	370 V
Average bias(A)	7.6 A
Gun ampere	165 A
Chamber pressure	1.03 mtorr

기본적으로  $N_2$  가스 주입량과 HCD gun 전압을 설정한 후 이에 따라 유기적으로 변화하는 챔버 압력과 온도 등에 따라  $Ar$  가스 주입량과 bias의 크기를 조절하였다.

Fig. 4는  $N_2$  가스 주입량을 각각 90ccm과 80ccm로 주입한 TiN 코팅 엔드밀로 가공하였을 때 나타난 절삭력을 비교한 그래프이다. Fig. 4를 보면 90ccm의 정상 상태보다 낮게 주입한 80ccm의 상태가 처음에는 절삭력이 낮지만 절삭길이 증가함에 따라 절삭력이 증가되어 결국 절삭력 증가율이 크다는 것을 알 수 있다.

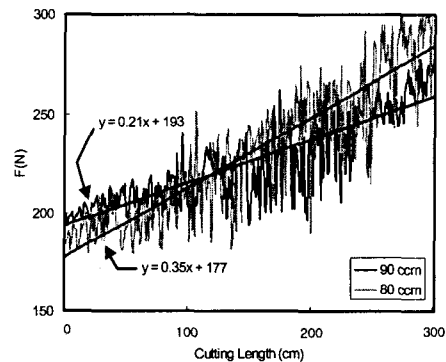


Fig. 4 Comparison of cutting forces when using  $N_2$  80ccm and  $N_2$  90ccm

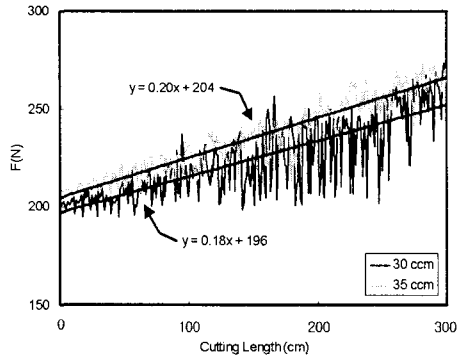


Fig. 5 Comparison of cutting forces when using Ar 30ccm and Ar 35ccm

Fig. 5는 Ar 가스 주입량을 각각 30ccm과 35ccm으로 하여 절삭력을 비교한 그래프이다. Fig. 4와 비교하여 보면 35ccm의 상태가 정상 상태인 30ccm보다 초기에 절삭력이 높지만 그 상태가 완만하게 지속되어 절삭력 증가율이 서로 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 6은 온도를 각각 490℃와 450℃로 하여 절삭력을 비교한 그래프이다. 절삭력이 증가되는 경향이 Fig. 4와 비슷하여 450℃의 상태가 정상 상태인 490℃의 상태보다 절삭력 증가율이 다소 높은 것을 알 수 있다.

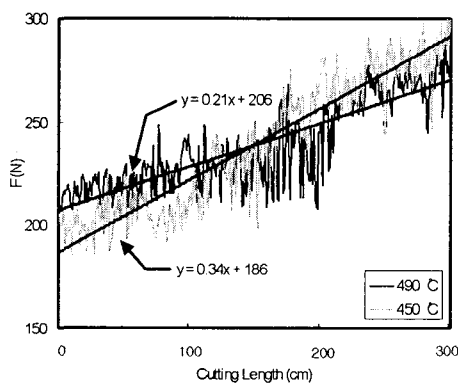


Fig. 6 Comparison of cutting forces when using temperature 450℃ and 490℃

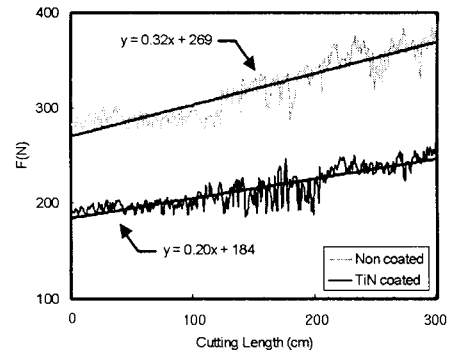


Fig. 7 Comparison of cutting forces when using non-coated and TiN-coated

Fig. 7은 TiN 코팅된 엔드밀과 코팅되지 않은 엔드밀의 절삭력을 비교한 그래프이다. 코팅이 안된 고속도강 엔드밀이 절삭 작업의 초기 시작부터 절삭력이 크다는 것을 알 수 있다. 반면에 TiN 코팅된 엔드밀의 절삭력을 보면 초기 시작부터 절삭력이 작으며, 절삭력 증가율 또한 완만하게 진행되는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

밀링 공구의 코팅 조건을 변화시킨 엔드밀을 사용하여 공구동력계를 통해 PC로 모니터링 하여 나타난 절삭력을 측정하여 절삭길이에 따른 절삭력 증가율을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 코팅 작업 시 bias 전압이 높을수록 코팅층 두께가 두꺼워진다
- (2) N<sub>2</sub> 가스 주입량이 정상 상태보다 낮으면 초기 절삭력은 작지만 절삭길이가 증가함에 따라 절삭력이 급하게 증가되어 전체적으로 절삭력 증가율이 높게 나타난다.
- (3) Ar 가스 주입량이 정상 상태보다 높으면 초기 절삭력이 커지지만 그 상태가 완만하게 지속되어 절삭력 증가율은 정상 상태와 비슷하게 나타난다.

- (4) 온도가 정상 상태 보다 낮으면 초기 절삭력은 작지만 전체적으로 절삭력 증가율이 높게 나타난다.
- (5) 코팅이 안된 고속도강 엔드밀의 절삭력이 TiN 코팅된 엔드밀보다 절삭 작업의 초기 시작부터 절삭력이 크게 나타난다.

### References

1. D.M. Mattox, "Design consideration for ion plating," Sendia Corp Report No, SC-R-65-997, 1966
2. V. Biel, H. Kneyrandish, and J.S.Colligon, "Thin Solid Films," No. 200, pp 283, 1991
3. J. Skogmo, and H. Norden, Refractory Metals and Hard Materials, 11 (1992) 49
4. O. Knotek, W. Münz, T. Leyendecker, J. E. Sundgren, and W. D. Münz, J. Appl. Phys., 673 (1990) 21
5. Y. Tanaka, T. M. Gür, M. Keely, S. B. Hagstrom, and T. Ikeda, Thin Solid Films, 228 (1993) 238
6. 윤주선, 김형준, 한전건, 송건, 대한금속학회지, 34 (1996) 192
7. R. F. Bunishah, "Deposition Technologies for Films and Coating," p 4 1982
8. 김일문, 이인우, 남옥현 "The Effect of Deposition Temperature on the Growth behavior of TiN deposited by PECVD," Journal of Korean Society for Heat Treatment, Vol. 6, No. 4, pp. 223~229, 1993
9. J.A. Sue and H.H. Troue "Surface and coatings technology," 33, pp. 169~181, 1986
10. 상공부, 공업 기반 기술 개발 과제 "금속이온 플레이팅 냉연간판 개발", pp. 228~249, 1992
11. H. J. Borning, and H. E. Hintermann, "Wear Resistant Coatings," 1988