

코팅공구의 마모 및 절삭특성

The Wear Behavior and Cutting Characteristics of Coated Tools

정진혁(서울대 대학원), 윤형석(서울대 대학원), 최덕기(강릉대 정밀기계공학과),
주종남(서울대 기계설계학과)

J.H.Jung(Graduate School, Seoul National Univ.), H.S.Yoon(Graduate School, Seoul National Univ.),
D.K.Chi(Dep. of Precision Mech. Engineering, Kangnung National Univ.), C.N.Chu(Dep. of Mech. Design
and Prod. Engineering, Seoul National Univ.)

ABSTRACT

To enhance the cutting performance of the tool, single or multilayer coating is applied on the substrate of the tool. Coating material reduces cutting force and heat generation in tool-chip contact zone and enhances resistance against abrasive wear. This paper presents that the effect of different coatings on abrasive wear resistance varies with work material and the flank wear rate is different with depth of cut. Crater wear rate is also found to decrease with higher thermal diffusivity of coating material. It is verified that the estimated thermal diffusivity of multilayer coating has consistent effect on the crater wear.

Key Words : Flank Wear(플랭크 마모), Crater Wear(크레이터 마모), Abrasive Wear(긁힘 마모), Thermal Diffusivity(열확산율)

1. 서론

현재의 절삭공정의 경향은 고정밀화·고능률화로 진행되고 있다. 특히 고능률화로 부터 요구되는 고속 가공에 적합한 공구의 개발이 절실하여, 공구와 공작물간 마찰감소, 절삭시 발생열의 저감, 긁힘마모저항 등의 장점을 갖는 코팅공구의 절삭특성을 파악하는 것이 중요하다. 코팅의 역할은 공구마모를 저연시키며 여러 가지 절삭성능을 개선하는 것이다. 특히 고속절삭의 경우, 발생하는 열을 처리하는 방법은 절삭방식에 따라서 다른 데, 경도가 열에 민감하게 저하되는 모재의 경우에는 모재로의 열확산을 차단시켜주는 코팅이 필요하고, 기계적인 충격력이 큰 밀링과 같은 작업에 있어서는 모재로의 열확산을 용이하게 해주는 코팅이 필요하다⁽¹⁾. 공구의 마모에는 크게 플랭크 마모와 크레이터 마모가 있으며, 플랭

크 마모의 주요 원인은 열보다는 긁힘이나 응착이며 크레이터 마모의 경우는 열이다⁽²⁾. 따라서 플랭크면에서는 코팅의 성질 중 응착력과 경도가 중요하며, 레이크면에서는 코팅의 열확산율이 중요하게 된다. 본 연구에서는 밀링에서 코팅공구의 플랭크 마모와 공작물·절삭속도·절삭깊이의 관계 규명 및 다층코팅에 대해서 산정한 열확산율과 실험적으로 측정한 크레이터 마모량과 칩의 형상에 대한 관계를 밝히고자 한다.

2. 코팅공구의 물성치 분석

2.1 코팅공구의 사양

절삭을 통한 마모실험을 하기 전에 기초적인 코팅공구의 물성치를 분석하였다. 물성치 분석은 세 종류의 공구에 대하여 하였고, 측정할 공구의 사양은 다

음과 같다.

종류	P	PM	CM
코팅배열	TiN	TiN/TiCN/TiN	TiC/TiCN/TiN
코팅 총두께	2 μm	3 μm	9 μm
코팅방식	TiC : CVD	TiN, TiCN : PVD	
공구제조 회사	미국 Kennametal 사		

Table 1. Specification of three coated tools

2.2 공구 모재의 경도, 인성 측정

기계적인 마찰, 마모는 재료의 경도, 인성과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있으나 실제로 그 관계가 명확히 밝혀진 것은 아니다. 따라서, 공구모재의 경도, 인성을 측정하여 마모특성 결과를 분석하였다..

(1) 실험 과정

실험에 사용된 공구는 CM, PM, P 세 개이고, Coating층을 벗겨낸 후에 #400, #800, #1200 SiC 연마지로 폴리싱한 후, 6 μm , 3 μm , 1 μm 으로 계속 폴리싱하였다. 그런 후에 빅커 경도계(Vicker's Indenter)를 이용하여 20kg, 30kg의 하중으로 경도 측정을 각 3회씩 하였다. 파괴인성은 반경방향 크랙의 길이를 이용하여 계산하였다⁽¹⁰⁾.

(2) 실험 결과

Type	Hardness (MPa)	Fracture toughness (MPa $\sqrt{\text{m}}$)
CM	15500	4.19
P	14300	4.84
PM	13200	5.34

Table 2. Hardness and fracture toughness of three coated tools

3. 코팅공구의 플랭크 마모 특성

3.1 절삭속도와 플랭크 마모

절삭속도가 높아질수록, 플랭크 면과 공작물의 접촉 면에서 온도가 올라가게 되고 코팅의 응착마모, 긁힘마모, 산화반응 등이 활발하게 된다⁽⁹⁾. TiN의 산화개시온도는 600°C이며, 이후 온도에 따라서 급격하게 산화량이 증가한다⁽⁴⁾.

본 실험에서는 두 가지 공작물을 대상으로 하였다. 여기서는 동일한 절삭속도의 조건 아래에서도 공작물에 따라서 코팅의 플랭크 마모특성이 달라지는 것

을 확인할 수 있다. 공작물의 종류 및 특성은 다음과 같다.

Type	Usage	Hardness	Remarks
HP-1A	Plastic mold steel	HV 192-228	Improved S55C
SKD-11	Alloy tool steel	HV 660-750	

Table 3. Characteristics of workpieces

3.1.1 공작물이 HP-1A(S55C) 인 경우

그림 1에서 보면, 코팅공구의 플랭크 마모는 절삭 속도가 커질 때 점차로 증가한다. PM은 P 보다 모재경도가 낮은 데도 불구하고 플랭크 마모가 작은 것은 코팅의 내마모성이 P 보다 좋은 것으로 보인다. 동일한 두께의 경우 단층보다 다층코팅의 내마모성이 좋은 것으로 알려져 있다. 그 이유는 다층코팅이 단층코팅보다 그 내부에서 응력분포가 완만하며, 균열 발생시, 다층코팅의 코팅간 경계면에서 균열이 편향하여 코팅 층이 파손되지 않기 때문이다⁽⁸⁾. CM은 코팅의 두께가 두꺼울 뿐만 아니라, TiC의 경도가 TiCN이나 TiN에 비해서 높고 CVD 법에 의한 모재와의 응착력이 뛰어나므로 내마모성이 가장 뛰어나다.

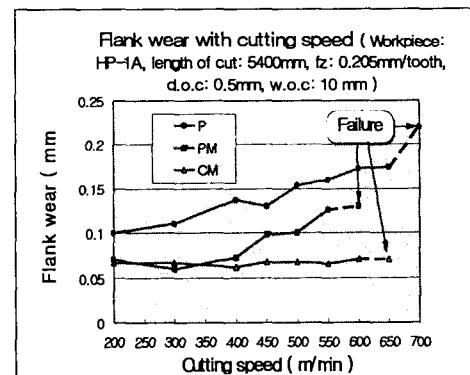


Fig. 1 Flank wear with cutting speed (HP-1A)

3.1.2 공작물이 SKD-11 인 경우

SKD-11은 경도 및 인성이 높은 재료로서 공구의 코팅파손을 쉽게 일으키는 것으로 보이며, 결과에서 보듯이 코팅의 내마모성이 효과를 냈다가 보다는 코팅이 절삭초기에 파손되어 모재의 경도가 내마모성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 따라서 공구모재 경도의 순서가 내마모성과 일치하는 것을 알 수 있다.

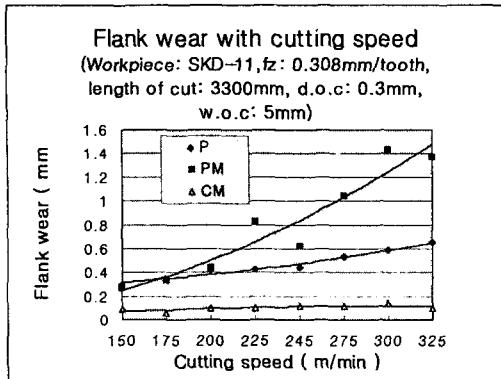


Fig. 2 Flank wear with cutting speed
 (SKD-11)

3.1.3 플랭크면 마모양상과 공작물의 표면거칠기
 가공면의 표면거칠기는 플랭크면의 상태에 직접적으로 영향을 받으며, 치수정밀도는 플랭크 마모량으로부터 직접적인 영향을 받는다. 3.1.2 절과 동일한 조건에서 절삭한 세 공구 플랭크면의 마모양상과 가공면의 표면거칠기에 대한 관계를 다음에 나타내었다. CM은 절삭깊이가 작은 이유로 공구 끝이 파손되었다. 마모량은 가장 작으나 파손된 면을 가지고 있으므로 P 보다 R_a 가 크게 나타난다. PM은 마모량이 가장 크고 마모면이 심하게 굴곡진 것을 볼 수 있으며 자연적으로 R_a 가 가장 큰 값을 나타냈다.

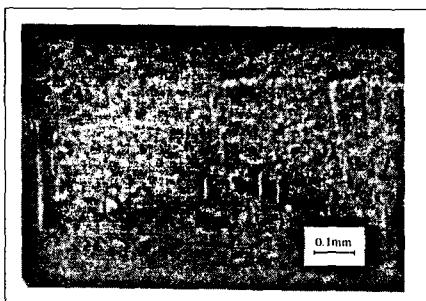


Fig. 3 Worn flank surface of P

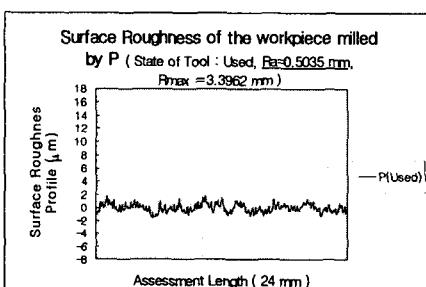


Fig. 4 Surface roughness profile of SKD-11 milled by P

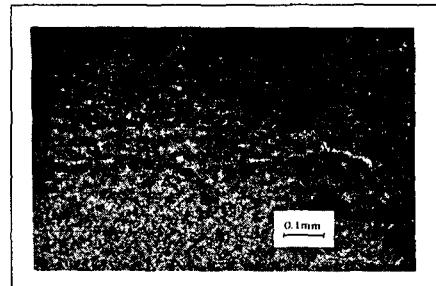


Fig. 5 Worn flank surface of CM

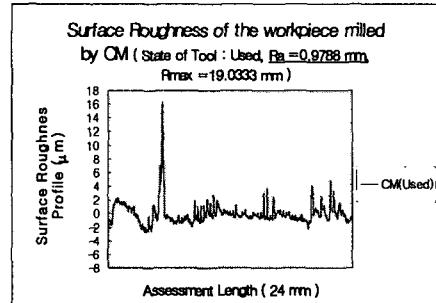


Fig. 6 Surface roughness profile of SKD-11 milled by CM

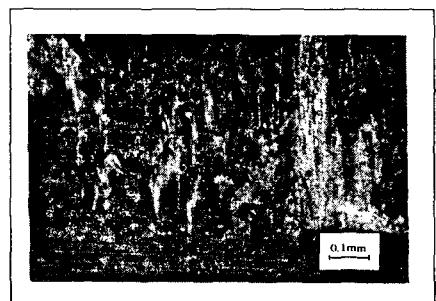


Fig. 7 Worn surface of PM

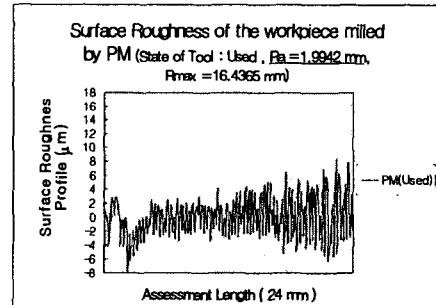


Fig. 8 Surface roughness profile of SKD-11 milled by PM

3.1.4 절삭속도와 공구파괴

절삭깊이가 작을 경우, 공구 끝의 취성은 파손을 일으키는 주요 원인이 된다⁽⁵⁾. CVD 코팅된 공구는 모재표면에 η -상을 가지며, 이 층은 모재내부와는 물리적 성질이 다르고 취성을 갖는다^(5,6). CM은 CVD 코팅법으로 제조된 것으로 특히 공구 끝에 취성을 가지며 공구파괴 빈도가 가장 높은 것을 알 수 있다. PM은 모재자체의 경도가 세 공구 중 가장 낮아 공구 끝이 파괴되는 것으로 보인다. 한편 P는 가장 적절한 모재의 경도를 가지고 있어 파괴된 경우가 없는 것으로 사려된다.

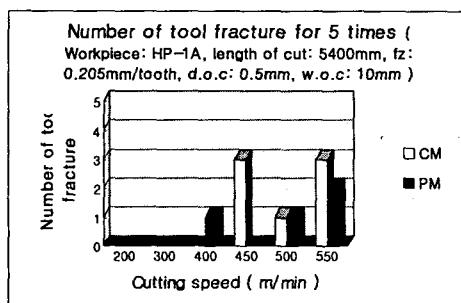


Fig. 9 Number of tool fracture for three coated tools

3.2 절삭깊이와 플랭크 마모

본 절에서는 절삭깊이가 플랭크 마모에 미치는 영향을 파악하는 데 목적을 두었다. 레이크면에서 존재하는 최고 온도영역이 절삭깊이가 작아질 수록 공구 끝으로 이동하게 되며 플랭크면의 온도는 상승한다. 온도가 상승하게 되면 코팅의 산화량이 증가하게 되며 내마모성이 줄어들게 된다⁽⁴⁾. 그러므로 절삭깊이는 플랭크면의 온도하고 밀접한 관계를 갖는다고 할 수 있다. 한편, 절삭깊이가 충분히 큰 경우 플랭크 마모를 지배하는 인자는 더이상 열이 아니며, 긁힘에 의한 것이라고 할 수 있고 긁힘마모에 대해 내마모성이 좋으려면 코팅의 경도, 모재와의 응착력이라고 할 수 있다. 그림 10에 그 결과를 나타냈다.

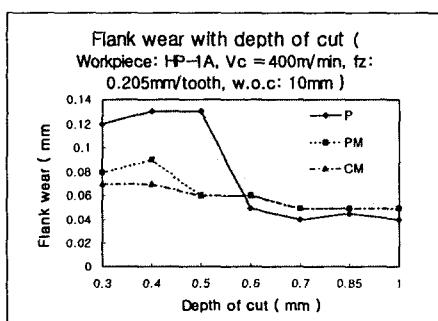


Fig. 10 Flank wear with d.o.c

4. 코팅공구의 크레이터 마모 특성

코팅의 열확산율은 공구의 레이크면 마모의 양상과 밀접한 관계를 가지고 있다. 절삭할 때 발생하는 열은 칩에 의해 대부분 흡수되고 그 일부는 공구모재에 전달된다. 공구모재로 전달되는 열의 양은 칩과 공구모재 사이에 있는 코팅의 열적 특성에 의해 좌우된다.

코팅의 열확산율은 공구모재로 전달되는 열의 양을 좌우하는 주요 인자로서, 열확산율이 큰 경우, 칩·공구간 발생하는 열이 모재로 많이 전달된다. 칩과 공구의 접촉부에서 발생하는 열이 모재로 잘 전달될 수록 칩이 함유하는 열량이 줄어들므로 칩 형상은 큰 곡률반경을 갖게 된다^(1,6). 칩의 곡률반경이 클수록 칩·공구간 접촉길이가 커지게 되어 칩에 의한 레이크면에서의 마모가 넓은 영역에서 고르게 진행된다. 이와는 반대로 코팅의 열확산율이 작은 경우는 칩·공구사이에서 발생되는 열이 공구모재로 잘 전달되지 못하고 칩·공구의 접촉면에서 많이 발생하게 되어 칩의 곡률반경은 작아지게 된다. 따라서 칩에 의한 마모가 공구 끝에서 집중적으로 발생하여 크레이터 마모는 좁은 영역에서 깊숙하게 발달한다. 본 장에서는 임의의 코팅두께를 갖는 다층코팅의 공칭 열확산율을 산정하는 방법과 이것을 근거로 크레이터 마모를 실험적으로 구한 값과 비교하여 잘 일치됨을 보인다.

4.1 다층코팅의 열확산율 산정

코팅 층의 표면에서 모재까지의 변위를 주요 관심으로 할 때, 1 차원에 대한 확산 방정식은 다음과 같다.

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

(α 는 열확산율, T 는 온도, x 는 변위, t 는 시간)

물질내부에서의 온도분포 곡선은 포물선이라고 가정한다. 온도의 침투깊이(penetration depth)를 $\delta(t)$ 라고 하고, 다음의 경계조건을 사용하여 양변을 변위 0에서 $\delta(t)$ 까지 적분하면 $\delta(t)$ 에 대한 식을 얻을 수가 있다.

$$\text{경계조건 : } \left. \frac{\partial T}{\partial \xi} \right|_{\delta(t)} = 0, \left. T \right|_{\delta(t)} = 0$$

$$\therefore \delta(t) = \sqrt{12\alpha t}$$

- 것을 임의의 층수 및 두께를 갖는 다층코팅에 적용하여 공칭 열확산율을 구하면 아래와 같다.

$$\bar{\alpha} = \delta_i^2 / \sum_i (\delta_i^2 / \alpha_i)$$

(단, i 는 층 번호, δ_i 는 코팅의 총 두께)

- 식을 이용하여 P, PM, CM 코팅의 공칭 열확산율을 구한 것을 표 4 에 나타내었다.

Type	$\bar{\alpha}$ (Nominal thermal diffusivity, m^2/s)
PM	44.75×10^{-6}
CM	25.13×10^{-6}
P	13.46×10^{-6}

표 4. 세 코팅의 공칭 열확산율

한편, 공구·공작물이 1회 접촉하는 시간은 절삭속도가 $400m/min$ 이고 절삭폭이 $10mm$ 일 때 밀링커터의 형상을 고려하여 계산하면 3.78×10^{-3} (sec)가 된다. 코팅두께가 가장 큰 CM의 경우, 침투깊이가 모재까지 전달되는 시간을 계산하면 2.69×10^{-7} (sec) 가 되어, 공구와 공작물이 1회 접촉하는 시간 동안 칩·공구사이에서 발생한 열이 모재까지 충분히 전달되는 것을 확인할 수 있다.

4.2 칩의 형상과 크레이터 마모

세 가지 코팅공구의 크레이터 마모 측정을 위한 실험의 절삭조건은 표 5 와 같다.

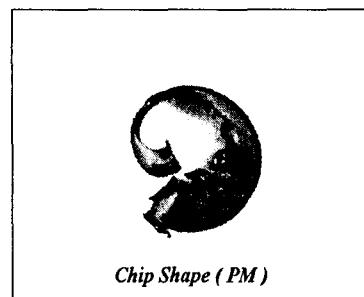
Workpiece	HP-1A
Cutting speed	$400 m/min$
Depth of cut	$1.5 mm$
Feed per tooth	$0.5 mm/tooth$
Width of cut	$10 mm$
Cutting time	$5 min$

Table 5. Cutting conditions

세 코팅공구로 절삭한 공작물의 칩의 형상을 그림 11 에 나타내었다. 4.1 절에서 산정한 공칭 열확산율과 칩의 형상이 잘 일치되고 있음을 알 수 있다. 공칭 열확산율이 가장 작은 P 코팅공구로 생성된 칩의 곡률반경이 가장 작게 나타난다.

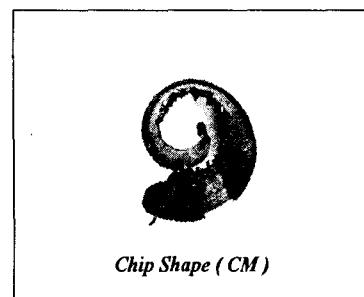
한편 크레이터 마모를 각각 측정해 본 결과를 표 6 에 나타냈다. P 코팅공구에 의해 생성된 칩의 곡률

반경은 PM에 의해 생성된 칩의 곡률반경보다 작아 칩·공구간 접촉길이가 짧아지므로 크레이터 마모는 공구 끝의 좁은 영역에 집중적으로 발달하게 된다. 따라서 P 코팅공구의 크레이터 마모량이 PM 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 한편, P 의 모재경도는 PM 보다 크다. 경도가 큰 재료가 내마모성이 좋은 것을 감안할 때, 위 실험의 경우 모재경도보다 코팅의 열확산율이 크레이터 마모에 더 중요하다는 결론을 얻을 수 있다. 그리고 CM 코팅공구의 경우는 모재경도와 코팅두께가 가장 크므로 크레이터 마모가 가장 작게 나타난다.



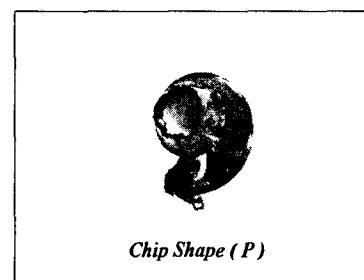
Chip Shape (PM)

(a)



Chip Shape (CM)

(b)



Chip Shape (P)

(c)

Fig. 11 Chip shape comparison for three coated tools

Type	Crater wear (mm)
P	0.36
PM	0.23
CM	0.07

Table 6. Crater wear of three coated tools

5. 결론

코팅공구의 플랭크 마모와 크레이터 마모특성을 비교 분석했으며 플랭크 마모의 주요원리는 긁힘마모이며 절삭깊이가 작은 경우 열에 의한 영향이 증가하여 긁힘마모 외에 응착마모 및 산화반응에 의한 마모가 중요해짐을 간접적으로 알 수 있었다. 한편 공구의 레이크면에서의 마모는 코팅의 열적 특성이 크게 좌우한다. 코팅의 열학산율이 클수록 공구모재로 전달되는 열량이 많아져 칩 변형의 곡률반경이 커지므로 마모부위가 넓게 발달한다. 따라서 공구 끝에서의 크레이터 마모량이 작아지므로 밀링공정과 같은 단속절삭에서는 기계적 충격에 대한 저항을 높여주게 된다. 본 연구에서는 열학산율 및 두께가 각각 다른 다층코팅의 공정 열학산율을 산정하는식을 유도하여 코팅의 열적 특성이 크레이터 마모에 미치는 영향을 예측할 수 있었다.

참고문헌

- W.König, R.Fritsch, D.Kammermeier, "New Approaches to Characterizing the Performance of Coated Cutting Tools", Annals of the CIRP, Vol.41, 1992
- Kenneth Holmberg, Allan Matthews, Coatings Tribology, Elsevier, p355, 1994
- Vancoille, E., Celis, J.P., Roos, J.R., "Tribological and Structural Characterization of a Physical Vapour Deposited TiC/Ti(C,N)/TiN multilayer", Tribology Int., 26 pp115-119, 1993
- Yasuyuki Yamada, Tsutomu Ikeda, "Coated Cutting Tools-Drills, Endmills", 精密工學會誌, Vol.61, No.6, pp778-782, 1995
- G.J.Wolfe, C.J.Petrosky, D.T.Quinto, "The Role of Hard Coatings in Carbide Milling Tools", J.Vac.Sci.Technol., 1986
- V.C.Venkatesh, C.T.Ye, D.T.Quinto, D.E.P.Hoy, "Performance Studies of Uncoated, CVD-Coated and PVD-Coated Carbides in Turning and Milling", Annals of the CIRP, Vol.40, 1991
- Boothroyd, G., "Temperatures in Orthogonal Metal Cutting", Proc. Inst. Mech. Engrs, 177, pp789-810, 1963
- Holleck, H., Lahres, M., Woll, P., "Multilayer Coatings - Influence of Fabrication Parameters on Constitution and Properties", Surface and Coatings Technology, 41, pp179-190, 1990
- Suh, N.P., Tribophysics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A., p489, 1986
- D.K. Shetty, I.G. Wright, P.N. Mincer, A.H. Clauer, "Indentation fracture of WC-Co cermets", Journal of materials science, pp 1873-1882, 1985