

STD-11의 경도변화에 따른 CBN볼엔드밀의 절삭특성

Cutting Characteristics of CBN Ball Endmills for STD-11 of Various Hardnesses

최상우*, 이기우**, 이원화***, 이세균***, 강추욱****, 이종찬*****

ABSTRACT

The use of CBN tool material has been greatly increased because of the superior metal cutting performance for the machining of hardened steels. This paper presents some experimental results on the ball endmilling of hardened steels. Three different hardnesses of STD-11 workpieces were machined using CBN ball endmills, and the machining characteristics including cutting forces, tool wear, and surface roughness of machined surface were compared. It has been found that the CBN ball endmill works better in the machining of harder workpieces. The microscopic examination explains that this unusual phenomenon is caused by the difference of microstructure of each workpieces.

Key Words : Cubic Boron Nitride (CBN, 입방정질화붕소), Tool wear (공구마모), Cutting force (절삭력), Abrasive wear (연마마모)

1. 서 론

최근 산업사회의 급속한 발전으로 인해 금속재료 또한 점점 난삭화되어가고 있으며, 공작기계의 가공 속도 또한 고속화 되어가고 있다. 이런 난삭재의 고속가공에 적합한 공구재료로는 인조다이아몬드와 CBN 등이 있으나 철계재료에는 CBN 공구재가 더 적합하다. 이러한 공구재는 고속도강이나, 초경합금 공구 등으로는 절삭이 곤란한 경질재료의 다듬질 절삭에서 우수한 성능을 발휘하며, 연삭공정을 생략하여 고능률가공이 가능하게 하게 되었다.

이러한 CBN 공구에 대한 연구는 CBN 공구의 절삭특성¹⁾과 CBN 소결체의 함유량에 따른 마모특성^{2)~4)} CBN 공구와 일반공구의 비교⁵⁾ 등이 있으나, 주로 선삭에 한정된 연구였으며 밀링가공에 적용한 연구는문^{6)~8)}도 최근 발표되고 있다.

본 논문에서는 여러 가지 경도로 열처리한 STD-11을 CBN 볼엔드밀로 가공할 때의 절삭특성과 공구마모에 대해서 규명하고, 경도변화에 따른 피삭재의 조직변화와 공구마모와의 관계를 규명하고

자 하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 실험방법

본 실험에 사용된 공구로는 CBN 볼엔드밀로서 CBN 소결체를 사용하여 초경공구의 몸체에 브레이징(brazing)하여 직경 10mm로 제작하였으며, 피삭재는 냉간 금형용 합금강(STD-11)을 사용하여 170L×50W×50H로 제작한 후에 열처리하여 로크웰 C 스케일로 16, 34, 50이 되게 하였다. Table 1은 CBN 볼엔드밀의 구성성분과 피삭재의 화학적 조성을 나타낸 것으로 STD-11은 탄소(C)와 크롬(Cr)이 많은 강으로서 부식에 강하고 상온에서 내마모성이 커 금형 및 공구제작에 널리 사용되고 있다.

Table 1 The compositions of tested cutting tool and workpiece material

		Chemical compositions (%)						
Tool		CBN 60% + WC, Ti, Al etc						
STD-11		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni
			1.51	0.59	0.59	12.2	1.03	0.34

* 금오공과대학교 기계설계공학과 대학원

** 대우 고등기술연구원

*** 금오공과대학교 기계공학과 산업대학원

**** (주) 대한중석

***** 금오공과대학교 기계설계공학과

본 실험에서는 피삭재의 경도변화에 따른 CBN 공구의 절삭특성과 공구마모를 규명하기 위하여 경사면에서 장시간 절삭실험하였다. Table 2는 실험조건을 나타낸 것이며, 본 실험에서는 절삭깊이를 0.2 mm와 0.4mm로 변화시키면서 절삭실험을 수행하였으며, 두 경우 모두에서 절삭저항력 및 공구마모(tool wear), 칩의 형상, 표면거칠기, 금속조직 등을 관찰하였다.

Table 2 Experimental conditions

Cutting speed	5,000 rpm
Feedrate	400 mm/min
Depth of cut	0.2 mm, 0.4 mm
Pickfeed	0.2 mm
Cutting length	34m
Cutting fluid	Neat-oil

2.2 실험장치

본 실험에 사용된 공작기계로는 머시닝센터(화천기계, ECOMIL 43V)를 사용하였으며, 절삭저항력의 측정을 위하여 압전형 공구동력계(Kistler, 9257B)를 머시닝센터 베드에 설치하고 그 위에 공작물을 고정하였다. 공구동력계에서 얻어진 신호는 다채널 증폭기(Kistler, 5091)로 증폭되었고, 이 증폭된 신호는 아날로그-디지털 변환기(IOtech, DaqBook)를 거쳐 디지털화되어 컴퓨터로 전송되었다. 컴퓨터에서는 Cutting Force Software를 사용하여 데이터를 분석하였다. Fig. 1은 이러한 절삭저항력 측정시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 공구마모는 영상현미경시스템을 이용하여 측정하였으며, SEM(TOPCON, ADT-60)으로 관찰하였고, 공작물의 표면조도측정은 접촉식 표면조도계(Mitutoyo, SV-600)를 사용하여 이송방향의 최대표면거칠기(R_{max})를 측정하였으며, 금속현미경(OLYMPUS, U-LBD-2)을 사용하여 금속의 조직을 촬영하였다.

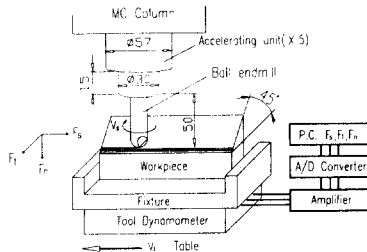


Fig. 1 Experimental system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭저항력

경도변화에 따른 절삭특성을 규명하기 위하여 절삭깊이를 0.2mm와 0.4mm로 변화를 주면서 피삭재를 절삭할 때 각 볼엔드밀의 절삭저항력중 공구마모에 크게 영향을 미치는 이송분력(F_s)과 법선분력(F_n)의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 절삭저항력의 측면에서는 경도변화에 따라 큰 차이는 보이지 않지만 HRc16인 피삭재가 가장 큰 절삭저항력이 작용하였고 HRc50인 피삭재가 가장 낮은 절삭저항력이 작용함을 알 수 있으며, 절삭깊이를 0.2mm와 0.4mm로 변화시켜도 동일한 결과를 가져왔다. 즉, 피삭재의 경도가 낮을수록 더 큰 절삭저항력이 작용함을 알 수 있다.

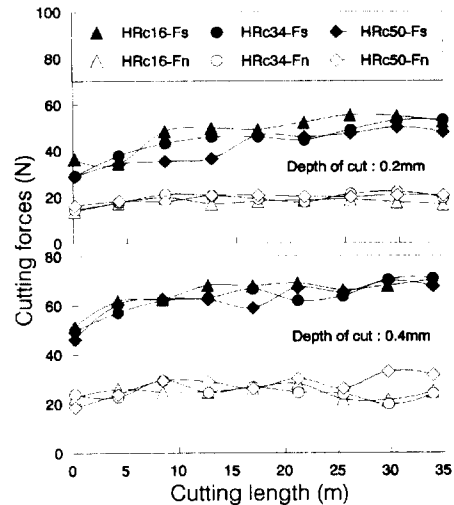


Fig. 2 Cutting forces vs. Cutting length of STD-11 for various hardnesses

3.2 공구마모

Fig. 3은 피삭재의 경도변화에 따른 절삭실험시 프랭크마모(flank wear)를 나타낸 그래프로서 경도가 HRc16인 피삭재를 가공한 경우가 가장 높게 나타났고, HRc50인 피삭재를 가공한 경우가 가장 낮게 나타났으며, 이는 절삭깊이를 변화시켜도 동일한 결과가 나타났다.

또한, Fig. 4는 CBN 볼엔드밀로 경도가 다른 피삭재를 절삭실험후 이송방향의 표면거칠기(R_{max})를 나타낸 그래프로서 그림에서 볼 수 있듯이 절삭깊이를 변화시켜도 경도가 HRc16인 피삭재가 가장 높게 나타났으며, HRc50인 피삭재가 가장 낮게 나타났다.

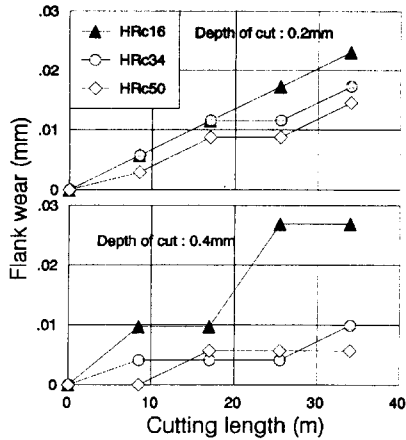


Fig. 3 Flank wear vs. Cutting length of STD-11 for various hardnesses

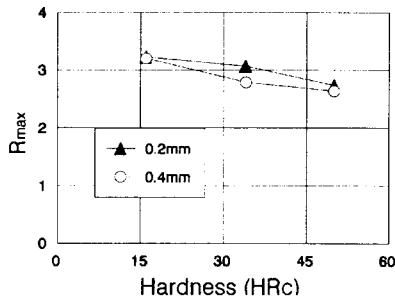


Fig. 4 Maximum roughness vs. Hardness of STD-11 for various hardnesses

Fig. 5는 절삭깊이를 0.2mm로하여 CBN 볼엔드밀로 34m절삭후 미시적인 마모를 관찰하기 위하여 SEM 촬영한 것이다. SEM사진을 보면 프랭크마모면에 연마마모(abrasive wear)의 흔적인 세로방향의 그르브(groove)를 볼 수 있으며, 또한 피삭재의 일부분이 응착된 것을 볼 수 있다. 이는 절삭깊이를 0.2mm로 하여 절삭을 하였을 때 주된 마모는 연마마모와 응착마모(adhesive wear)라는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 절삭깊이를 0.4mm로 하였을 때 34m절삭 후 SEM 촬영한 것이다. 프랭크마모면을 보면 응착물이 미소하게 존재하지만 주된 마모는 연마마모임을 알 수 있는 그르브가 파여져 있으며, 경도가 낮을수록 그르브는 뚜렷하고 그 크기도 커지고 있다. 이는 Fig. 5와 Fig.6에서 보면 공통적으로 나타난다. 특히, 경도가 HRc16과 HRc34인 경우의 프랭크마모면을 보면 연마마모의 현상이 뚜렷하게 나타나고 있으며, HRc50의 경우는 이러한 현상이 적다. Fig. 7은 절삭깊이가 0.4mm일 때 각 볼엔드밀의 프랭크마모면을 EDX 분석한 것이다. 분석결과를 보면 경도가 낮을 때는 공구표면에 피삭재로부터 응착된 Fe



(a) HRc16

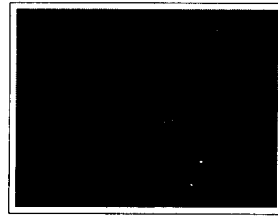


(b) HRc34



(c) HRc50

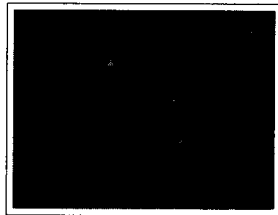
Fig. 5 SEM micrograph of CBN ball endmills (Depth of cut : 0.2mm)



(a) HRc16



(b) HRc34



(c) HRc50

Fig. 6 SEM micrograph of CBN ball endmills (Depth of cut : 0.4mm)

와 Cr의 산화물이 많이 나타나고 있으나, 경도가 높아질수록 Fe와 Cr의 산화물이 줄고, 공구의 결합제(binder) 성분인 Al과 Ti의 산화물이 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 STD-11을 CBN 볼엔드밀로 절삭을 할 때 피삭재종의 단단한 입자가 CBN의 표면에 연마작용을 일으켜서 떨어져나가는 연마마모가 일어난다고 추론할 수 있다. 이를 검증하기 위하여 금속의 조직사진을 촬영하였다.

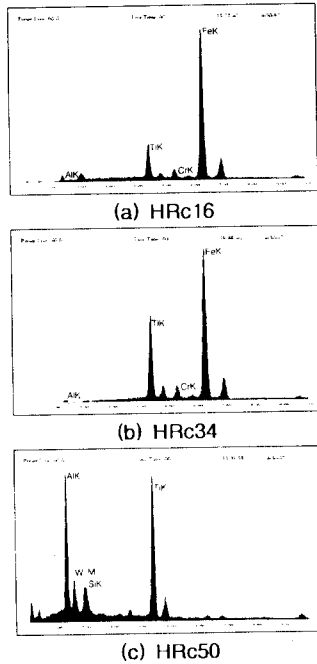


Fig. 7 EDX analysis of CBN ball endmills (Depth of cut : 0.4mm)

피삭재의 조직과 CBN 소결체 입자와의 연마마모 관계를 규명하기 위하여 SEM으로 피삭재의 조직을 촬영하였다. Fig. 8(a)는 HRc16 피삭재의 표면을 1000배로 확대한 금속현미경 사진으로 퍼얼라이트(pearlite)와 유사한 조직의 기지에 큰 잔류 오오스테나이트(retained austenite)가 여러곳에 존재하는 microstructure임을 알 수 있다. Fig.8(b)는 HRc16 표면에 존재하는 탄화물을 5000배로 확대한 SEM 사진으로 큰 구상의 탄화물 입자들이 많이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이 탄화물들의 성분을 분석하기 위하여 EDX 분석을 한 결과 이들은 Fig. 9와 같이 Cr과 Fe의 탄화물((CrFe)₇C₃ 등)인 것을 알 수 있었다. HRc34인 피삭재의 경우는 Fig. 8(c)의 1000배 금속현미경 사진에 나타난 바와 같이 마르텐사이트(martensite) 조직에 탄화물이 석출한 조직임을 알 수 있으며, Fig. 8(d)는 이 조직을 SEM으로 5000배 확대한 사진으로 HRc34의 경우도 탄화물이 석출하

나 HRc16의 경우보다 그 양이 훨씬 적은 것을 알 수 있다. HRc50인 피삭재의 경우 Fig. 8(e)(f)에서와 같이 탄화물의 석출량이 매우 적다.

이상의 결과를 종합하여 보면 다음과 같은 해석이 가능하다. 고탄소 고크롬강인 STD-11의 경우 경도가 낮아지도록 열처리하면 조직내에 Cr, Fe의 탄화물들이 비교적 큰 크기로 석출되고(경도가 낮아지도록 열처리할 경우 열처리시 어닐링(annealing) 시간이 길게 되므로), 이렇게 석출된 Cr, Fe 탄화물((CrFe)₇C₃ 등)들이 CBN 공구에 연마작용(abrasive action)을 일으켜 공구마모를 촉진하게 된다.

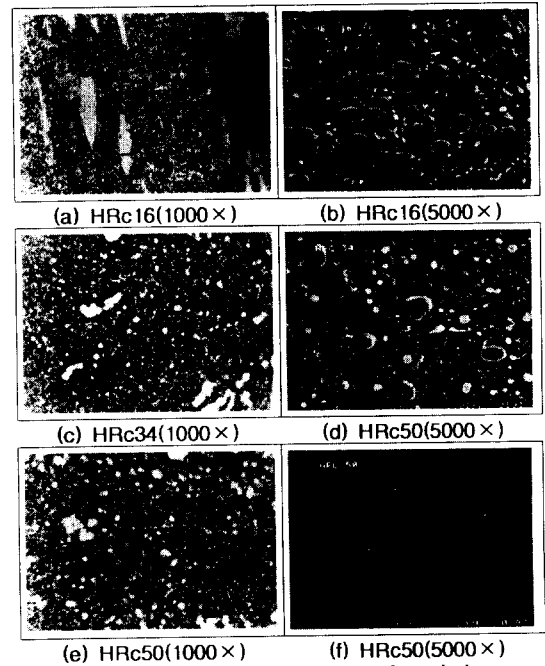


Fig. 8 Metallurgical micrograph of workpieces

공작물의 이러한 조직의 차이는 절삭시 발생하는 칩의 형상에도 영향을 미친다. Fig. 10 (a) (b)는 각각의 경도변화에 대한 칩(chip)의 형상을 나타낸 것이다. 절삭깊이가 0.2mm일 때 경도가 HRc50인 피삭재의 칩의 형상은 절삭시 칩이 공구의 경사면을 따라 슬라이딩(sliding)이 끝부분까지 연속적으로 진행되는 유동형칩이 생성되는 것을 볼 수 있으며, 경도가 HRc16과 HRc34일 때의 칩은 유동형칩이 생성되거나 칩의 폭이 좁은 것을 볼 수 있다. 또한 절삭깊이가 0.4mm일 때도 동일한 결과를 보여주고 있다. 이러한 칩의 형상이 생성되는 것은 경도가 낮은 STD-11을 절삭할 때는 피삭재내의 Cr·Fe의 탄화물의 크기가 크기 때문에 칩이 잘게 끊어져 성형되기 때문이다.

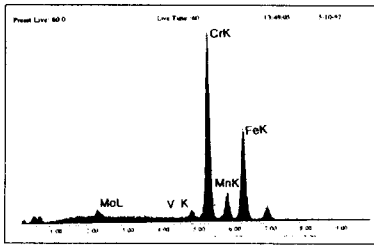
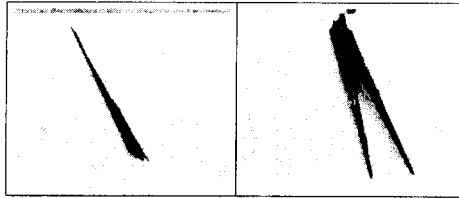
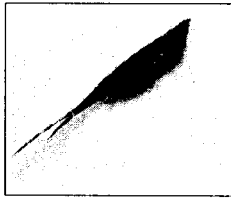


Fig. 9 EDX analysis of the Cr, Fe carbide in the HRc16 workpiece



HRc 16

HRc34



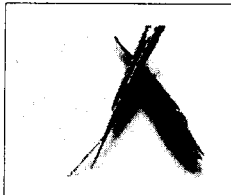
HRc50

(b) Depth of cut : 0.2mm



HRc 16

HRc34



HRc50

(b) Depth of cut : 0.4mm

Fig. 10 Chips of STD-11 for various hardnesses

4. 결론

이상으로 CBN 불엔드밀로 절삭깊이를 변화시켜 가면서 경도변화에 대한 절삭특성과 마모특성의 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 피삭재의 경도가 낮을수록 절삭저항력 및 공구마모, 표면거칠기 등은 증가하였다.

2. 냉간 금형용 합금강(STD-11)을 CBN 공구로 절삭할 때 프랭크마모(flank wear)는 주로 피삭재내의 Cr·Fe의 탄화물과 CBN 입자간 연마마모(abrasive wear)의 형태로 발생한다.
3. 피삭재의 경도가 낮을수록 프랭크마모가 커지는 것은 낮은 경도에서 오히려 피삭재내의 Cr·Fe의 탄화물 크기가 커지고 양이 증가하여 연마작용이 상승하는데 기인한다.
4. CBN 공구의 프랭크마모는 피삭재의 경도에 따라 비례하는 것이 아니고 피삭재의 조직에 따라 다를 수 있다.

참고 문헌

1. 新谷一博, 加藤秀治, 藤村善雄, 山本 明, "CBN 工
具によるオーステンパ處理を施ベイト地球狀黒
鉛鑄鐵の切削特性", 日本精密工學會誌, Vol. 56,
No. 12, pp.2261-2266, 1990.
2. Norihiko Narutaki, "高速切削におけるセラミック
系工具の損傷", 日本機械學會論文集(C編), Vol.
58 No. 543, 1992.
3. Tsuneo Egawa, " 焼入れ鋼の切削におけるcBN焼
結工具の摩耗機構", 日本精密工學會誌, Vol. 61,
No. 6, pp. 809-813, 1995.
4. S. Enomoto, M. Kato and S. Miyazawa, "Flank
wear of CBN cutting tools of various
composition", Journal of Mechanical Working
Technology, Vol. 17, pp. 177-186, 1988.
5. Shigeo Zaima, "CBN 工 具 における 工 具 摩 耗 につ
いての考察" 日本金屬學會誌, Vol. 47, No. 1, pp.
80-89, 1983.
6. 이기우, 최상우, 강추욱, 이종찬, "CBN 불엔드밀
에 있어서 최적절삭조건에 관한 연구-I", 한국절
밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.20-25, 1996.
7. 이기우, 최상우, 김주원, 김호성, 이종찬, "CBN 불
엔드밀의 절삭 및 마모특성에 관한 연구", 한국
정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.107-113,
1996
8. 이기우, 최상우, 이종찬, "CBN 재중에 따른 불엔
드밀의 특성에 관한 연구", 금오공과대학교 생산
기술연구소 논문집, Vol. 12, 1996.