

고경도 금형강의 CBN 볼 엔드밀 가공에서 가공성 평가

김홍규*, 심재형⁺, 이종찬⁺⁺
(논문접수일 2007. 6. 7, 심사완료일 2007. 8. 7)

Machinability Evaluation of CBN Ball End Milling in Die & Mold Steels with High Hardness

Hong-Gyoo Kim*, Jae-Hyung Sim⁺, Jong-Chan Lee⁺⁺

Abstract

Generally, the machinability of materials that have a good mechanical properties is poor. The material having a high strength, high toughness in high temperature and wear resistance, it is difficult to remove a chip from workpiece. STD11 and NAK80 are kinds of these materials and these materials can be used in many industrial fields. But it is limited in use because of high cost and poor machinability. In this experimental study, the cutting of STD11 and NAK80 were used to decide the machinability and the tool shape of CBN ball end mill. From the results, the CBN ball end mill is verified that the estimated cutting edge shape of rake angle 30 degree has consistent effect on the tool wear and cutting force.

Key Words : CBN(Cubic Boron Nitride ; 입방질화붕소), Ball end mill(볼 엔드밀), Die & Mold materials(금형강 재료), Rake angle(경사각), Machinability evaluation(가공성 평가)

1. 서론

최근 금속산업의 발달로 기계, 전자, 자동차, 항공 등의 많은 분야에서 각종 금형 및 기계부품에 적용되는 재료가 점차 난삭화 되어짐에 따라 금형가공업체나 기계가공업체에서는 높은 정밀도와 공정 감소, 납기 단축 등을 위하여 고속가공의

적용과 더불어 난삭재를 가공할 수 있는 신소재 공구재료의 개발이 요구되고 있다^(1,2).

종래에는 고경도 열처리강의 가공에 있어 연삭가공이나 방전가공이 주류를 이루고 있었다⁽³⁾. 그러나 최근에는 공작기계 및 공구의 발달로 고능률, 고품위가공을 위해 고속가공기술이 금형산업을 비롯한 여러 산업현장에서 점차 확대되고 있다^(4,5).

* 부산대학교 대학원 지능기계공학과 (kimhg@pusan.ac.kr)
주소: 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
+ 부산대학교 대학원 지능기계공학과
++ 금오공과대학교 기계공학과

미국의 GE사에서 1972년에 고속가공에 적합한 신소재 공구재료로 초고압 상태에서 소결한 다결정 인조 다이아몬드(PCD, Polycrystalline Diamond)를 개발하였으며, 1980년대에는 비슷한 방법으로 다결정입방질화붕소(PCBN, Polycrystalline Cubic Boron Nitride)가 개발되어 난삭재의 절삭가공에 적용이 가능하게 되었다.

고경도 금형강의 절삭가공에 적용되고 있는 CBN 공구는 연구 초기의 어려움으로 주로 선삭 가공을 중심으로 연속 절삭작업에 적용되어 왔으며, 밀링과 같은 단속 절삭에 적용한 사례는 아직도 미진한 상태이다⁽⁶⁾.

최근에는 고속가공기의 발달로 학계를 중심으로 CBN 공구재료를 금형강의 고속가공에 활용하기 위해 볼 엔드밀의 개발 시도가 이루어져 왔으며, 국내 공구업체에서도 이에 맞추어 고속 정밀금형 가공용 CBN 볼 엔드밀의 개발이 활발하게 진행되고 있다.

볼 엔드밀에 의한 절삭은 공구의 기하학적 형상이 복잡하며 공구의 구조상 중심인선에서 직경방향으로 속도가 거의 영에 가까운 영역에서부터 높은 영역까지 변화되어 절삭날의 위치에 따라 다양한 절입 형태가 이루어지며 각기 다른 절삭속도와 공구마멸 현상을 갖게 된다^(7,8).

절삭속도 증가에 따른 CBN 볼 엔드밀의 성능에 대한 연구에서 Ikeda는 절삭속도가 증가할수록 공구마멸이 감소한다고 주장하며, Kramer와 GE사는 절삭속도가 증가할수록 공구마멸이 증가된다는 상반된 결과를 제시하고 있으며, 절삭유의 사용에 따라 CBN 볼 엔드밀에 미치는 영향에 대해서도 Ikeda와 GE사는 상반되는 연구결과가 발표되어 현장 적용에 어려움을 갖고 있다^(9,10).

따라서 본 논문에서는 CBN 볼 엔드밀의 현장 적용을 위하여 예비단계로서 대표적인 금형재료의 절삭가공에서 CBN 공구의 절삭성능과 마멸 특성을 규명하기 위해 절삭유제가 표면조도에 미치는 영향 및 공구형상이 절삭성능에 미치는 영향 등을 검토하였다. 그리고 위에서 결정된 공구형상을 가지고 냉간금형용 합금공구강(냉간금형강, STD11)과 프리하든강(NAK80)의 절삭가공에 있어서 CBN 볼 엔드밀의 절삭성능을 밝히고자 한다.

2. CBN 볼 엔드밀의 성능평가 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 재료

본 연구에서는 CBN 볼 엔드밀로 금형강(냉간금형강, 프리하든강)의 가공에서 CBN 볼 엔드밀의 절삭성능 및 마멸 특성과 절삭유의 사용 유무가 공구의 절삭성능과 공구마멸

에 미치는 영향에 대해서 실험하였다.

실험에 사용한 공작기계는 최대 주축회전수가 50,000 rpm 인 고속 머시닝센터(Seiki NV5000)가 사용되었으며, 공구의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 절삭력을 측정하는 공구동력계는 Kistler사의 9273시리즈를 사용하여 머시닝센터 베드에 설치하고, 그 위에 공작물을 고정하였다. 공구동력계에서 얻어진 신호는 다채널 증폭기(Kistler, 5807A)로 증폭되었고, 이 증폭된 신호는 아날로그-디지털 변환기(Data translation DT3831-G)를 거쳐 컴퓨터로 전송하여 데이터를 분석하였다. 공작물의 표면조도는 분해능이 10nm인 스타일러스 표면조도 측정기를 사용하였다.

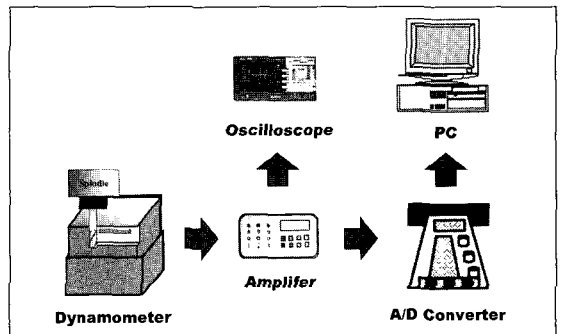


Fig. 1 Experimental system

Table 1 The compositions of tested cutting tools

Tested cutting tools	Composition
CBN-A	CBN(90%) + Co, Ni, Al
CBN-B	CBN(50%) + Ti, Al
CBN-C	CBN(80%) + Ti, Al
CBN-D	CBN + WC, TiN, Al
Coated carbide	WC + Co, TiC, TaC + TiN coating

본 연구에 사용된 공구는 CBN 소결체를 사용하여 국내에서 제작한 세 종류의 CBN 볼 엔드밀(이하 CBN-A, CBN-B, CBN-C)과 비교공구로서 상용화되고 있는 외산 CBN 볼 엔드밀(이하 CBN-D) 및 코팅 초경 볼 엔드밀로서 동일한 공구직경 10mm, 2날을 사용하였다. 시험에 사용된 공구재료의 구성 성분은 Table 1과 같다.

시험에 사용된 공작물로는 현재 금형재료로 널리 사용되는 냉간금형강(STD11, HRC 50~51)과 프리하든강(NAK80, HRC 40~41)을 L×W×H(155mm×80mm×50mm)로 제작하여 실험을 행하였다. Table 2는 각 시험재료의 조성을 나타내고 있다.

Table 2 Chemical compositions of workpiece materials

Workpiece material	Chemical compositions(%)							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	P
STD11	1.51	0.39	0.58	12.2	1.03	0.34	0.47	0.03
NAK80	0.12	0.29	-	-	-	-	3.15	0.21

2.2 실험 방법

본 실험에서는 CBN 공구의 절삭성능을 다양하게 평가하기 위해서 3가지 단계로 나누어 실시하였으며, 첫째는 절삭유의 영향을 알아보기 위해 현재 시중에서 상용되는 외산 CBN-D 공구로 시험을 행하여 적절한 절삭유를 결정하였다.

다음 단계에서는 절삭유를 사용한 상태로 CBN-A 공구재료로서 3가지 형상으로 공구 경사각을 달리 제작하여 절삭력 및 마멸현상을 비교한 다음에 공구의 형상 결정을 선택하였다.

세번째 단계에서는 가장 적절한 공구 형상을 가지고, 재종별 CBN 공구와 코팅 초경공구의 가공성 평가를 위해서 냉간금형강과 프리하든강 금형재료에 절삭실험을 하였다.

Table 3은 실험목적과 파라미터를 나타내었으며, 본 실험에서 절삭조건은 Table 4와 같다.

Table 3 Test purpose and parameter

	Purpose	Measurement	End mill
Test 1	Choice of cutting oil	Cutting force, roughness	CBN-D
Test 2	Choice of ball end mill's rake angle	Cutting force, wear pattern	CBN-A
Test 3	Several ball end mills test	Cutting force, wear, Roughness, chip shape	CBN-B, CBN-D, WC end mill

Table 4 Cutting conditions of test

Cutting speed(rpm)	10,000
Feed(mm/rev)	0.02
Pick feed(mm)	0.2
Depth of cut(mm)	0.3
Cutting oil	Wet cutting oil (Castrol, ILOCUT480)

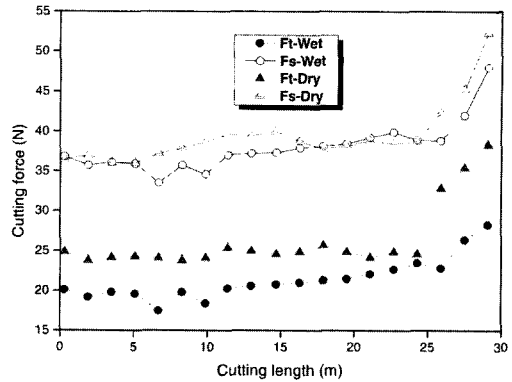


Fig. 2 Cutting force versus cutting length for dry and wet cutting

3. CBN 볼 엔드밀의 가공성 평가 및 고찰

3.1 절삭유제의 절삭성능 효과

CBN 볼 엔드밀에 대하여 건식절삭 및 비수용성 절삭유를 사용한 경우의 절삭력 및 표면조도에 미치는 영향을 살펴보았다. 공구형상에 대한 변수를 배제하기 위해 상용화되고 있는 외산 공구인 CBN-D 볼 엔드밀을 사용하였으며, 공작물로는 냉간금형강을 사용하였다.

Fig. 2는 건식절삭 및 비수용성 절삭유를 사용한 경우의 절삭력을 비교한 그래프이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 절삭력은 비수용성 절삭유를 사용한 경우가 절삭유제를 사용하지 않은 경우보다 이송분력(Fs) 및 접선분력(Ft)에 있어서 약간 낮게 나타났다.

Fig. 3은 절삭실험을 실시한 후에 공작물의 표면조도를 측정하여 비교한 것이며, 비수용성 절삭유를 사용한 경우가 건식에 비해 표면조도면에서 매우 우수했다.

비수용성 절삭유를 사용한 경우와 건식으로 작업을 한 경우의 공작물의 표면 상태와 칩의 형태는 Fig. 4와 같다. 건식절삭의 경우는 불안정한 절삭특성에 의해 칩의 중간부분이 잘게 잘라져 나가는 형상을 가지며 공작물 표면에 칩으로 인한 긁힘 현상이 발생한 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 가공후의 공작물의 표면조도를 나타낸 것으로서 비수용성 절삭유를 사용한 경우가 건식절삭에 비해 표면 거칠기 및 공작물 표면의 형상에 있어서 월등히 우수함을 볼 수 있다. 이러한 원인은 건식절삭의 경우에는 칩 배출이 원활하지 않아 절삭가공 중에 칩이 공작물과 공구사이에서 끼어 간섭을 일으켜 절삭면의 조도에 나쁜 영향을 미치지만 윤활성이 우수한 비수용성 절삭유를 사용한 경우에는 칩이

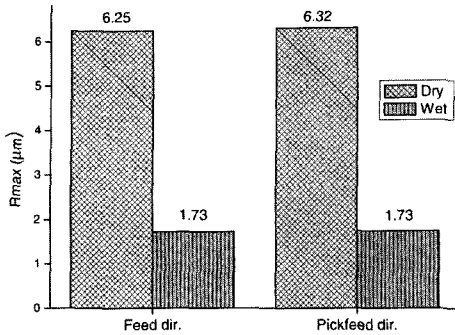
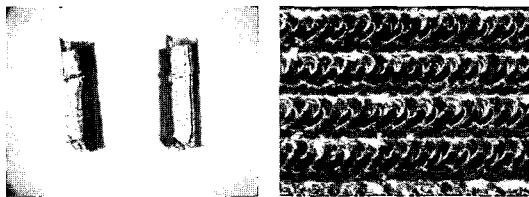
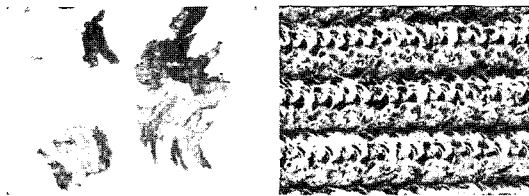


Fig. 3 Surface roughness of workpiece for dry and wet cutting



(a) Wet cutting ($R_{\text{max}} : 2.2\mu\text{m}$)



(b) Dry cutting ($R_{\text{max}} : 8.35\mu\text{m}$)

Fig. 4 Machined surface and chip for dry and wet cutting

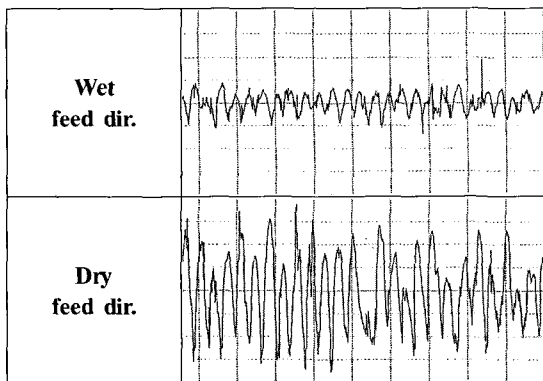


Fig. 5 Surface profiles of workpiece for dry and wet cutting

절삭유를 따라 원활히 배출되어지고 또한 공작물과 공구간의 마찰을 줄여 주기 때문에 공구 마멸 및 절삭 가공면의 형상에서도 우수하다고 고려되어진다⁽¹¹⁾.

3.2 공구형상(경사각)의 절삭성능 효과

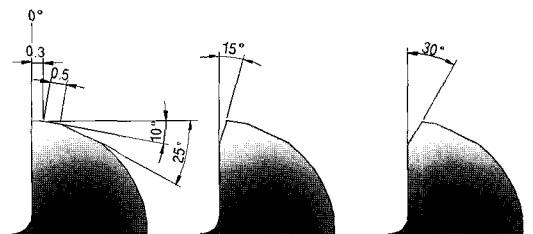
볼 엔드밀의 기하학적 공구형상에 있어서 주요 인자는 날 수, 헬릭스 각, 경사각, 여유각 등이 있으나 본 연구에서는 고경도 금형소재의 특성상 경사각이 절삭성능에 가장 크게 영향을 미친다는 보고⁽¹²⁾에 의해 경사각 측면에서만 형상 결정 인자로 검토하였다.

CBN 볼 엔드밀의 경사각(rake angle)이 절삭성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 경사각을 음(-)의 각도로 0°, 15°, 30°로 제작하였으며, 45°인 경우는 연삭숫돌과 공구형상의 기하학적 특성으로 인하여 제작이 불가능하였다. 실험공구로는 CBN-A로 제작한 볼 엔드밀로서 공작물은 냉간금형강을 사용하여 절삭력과 공구마멸에 미치는 영향을 실험하였다.

Fig. 6은 실험에 사용된 각 볼 엔드밀의 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 나타내지 않았지만 공구에서 음의 경사각 0°, 15°, 30°에 대한 절삭저항력인 이송분력(Fs), 접선분력(Ft) 그리고 법선분력(Fn)은 절삭 길이가 증가함에 따라 거의 같은 증가율을 보이고 있으나 절삭력의 절대적인 크기는 경사각 -15°의 볼 엔드밀이 가장 높고, 경사각 -30°의 볼 엔드밀이 가장 적은 힘이 걸리는 것을 확인하였다.

이것은 고경도 금형강의 고속가공에 있어서 임계 공구형상이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 7은 각 경사각을 갖는 공구형상 별로 볼 엔드밀의 공구마멸과 공작물의 가공표면 형상을 나타낸 것이다. 경사각 0°의 CBN 볼 엔드밀은 공구선단의 절삭부에서 공구마멸이 발생하였으며, 경사각 -15°의 CBN 볼 엔드밀에서는 공구와 공작물의 경계면에서 경계마멸이 발생하였음을 볼 수 있었다. 반면 경사각 -30°의 CBN 볼 엔드밀에서는 공구마멸이 거의 발생하지 않았다. 이것은 CBN 공구가 경도가 높은 반면



(a) Rake angle 0° (b) Rake angle 15° (c) Rake angle 30°

Fig. 6 Geometry of each CBN ball end mill

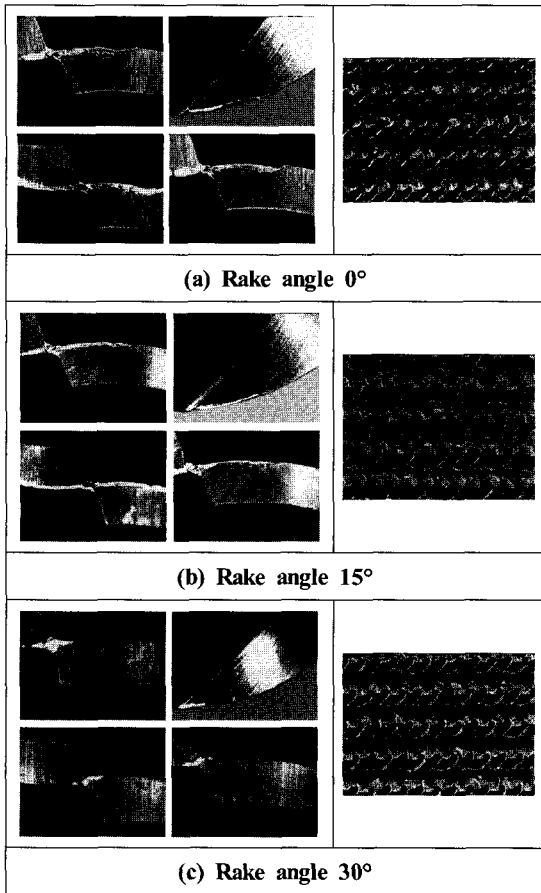


Fig. 7 Tool wear and workpiece surface for various rake angles

인성이 약한 특징과 절삭과정이 단속절삭이므로, 절삭날의 치핑(chipping)으로 인하여 공구마멸이 발생되어지기 때문이다. 따라서 공구의 경사각을 음으로 제작하고 또한 인선부의 선단을 보호하기 위하여 모따기(chamfer)나 호닝(honing)처리를 함으로써 절삭날의 치핑현상을 방지하고 공구의 강성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

3.3 공구재종별 가공성 평가

선행 실험결과를 바탕으로 제작된 경사각 -30°의 CBN-B, 외산 CBN-D 및 코팅 초경 볼 엔드밀을 사용하여 절삭성능 비교를 위해 공작물은 냉간금형강과 프리하든강을 사용하여 CBN 공구의 마멸특성과 각 공작물에 대해 CBN 공구의 특성을 살펴보았다.

각 볼 엔드밀로 냉간금형강을 절삭할 때 발생하는 절삭력

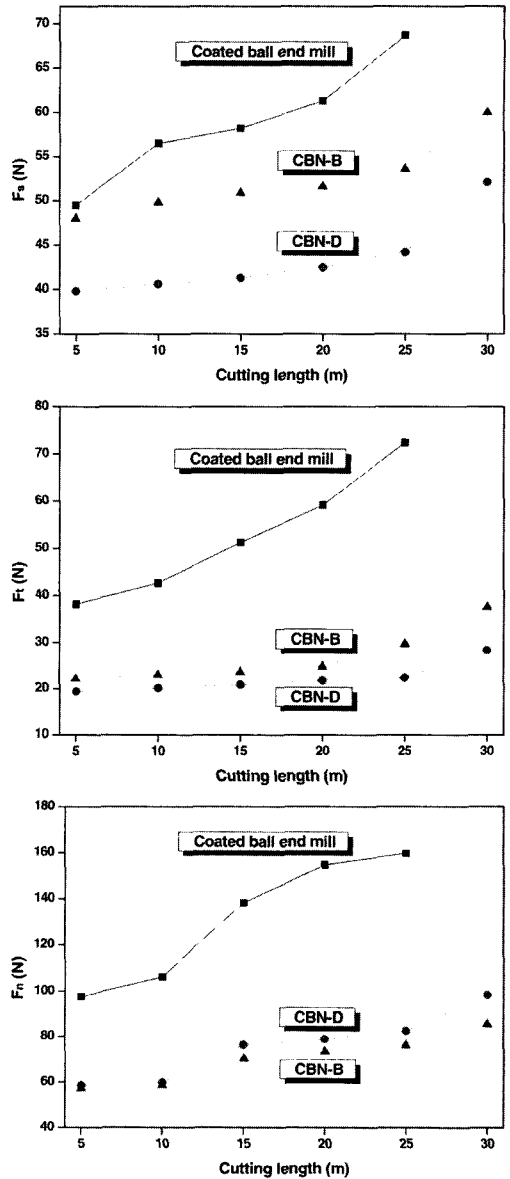


Fig. 8 Cutting force versus cutting length for STD11 materials

의 3분력의 값을 측정 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 전 절삭과정에서 코팅 볼 엔드밀, CBN-B, CBN-D의 순으로 절삭력이 크게 측정되었고, 초경공구가 두 CBN 공구에 비하여 절삭력 크기 및 편차가 뚜렷하게 구별되었다.

먼저 코팅 초경엔드밀의 절삭에서 측정된 절삭력은 CBN

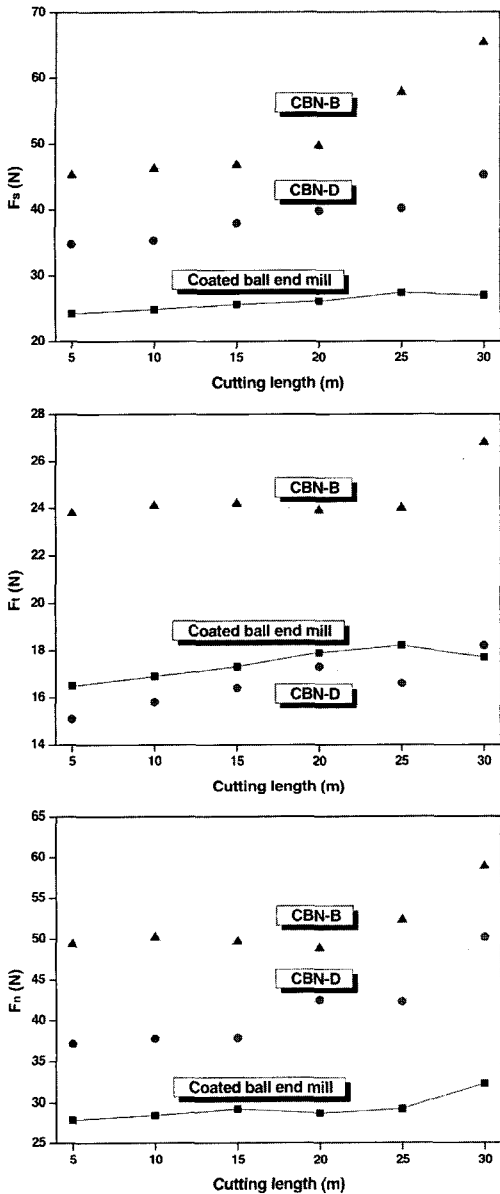


Fig. 9 Cutting force versus cutting length for NAK80 materials

공구에 비하여 세 분력이 모두 2배 이상의 값으로 측정되었고, 절삭거리 30m에 해당하는 영역에서는 절삭력이 측정범위를 벗어나 데이터를 얻을 수 없을 정도로 절삭력이 커지는 현상이 발생하였다. 이는 피삭재의 경도가 코팅 초경 엔드밀의 추천 절삭영역을 넘어서 공구마멸로 진행되어 발생된 것으로 판단된다. 특히 고경도 피삭재를 절삭함에 따라 절삭초

기에 코팅층의 박리가 발생되고 이에 따른 절삭면의 마찰이 증가되어 절삭력이 급속히 증가하는 현상이 발생된 것으로 판단된다.

새로이 제작한 CBN-B 볼 엔드밀과 외산 CBN-D 볼 엔드밀을 비교해 보면 접선분력(Ft)과 법선분력(Fn)의 값은 비슷하게 나타났으나 이송분력(Fs)의 값은 CBN-B 볼 엔드밀이 다소 높게 나타났다. 이는 상용되는 외산공구에 비해 자체 제작된 엔드밀 공구소재에 대한 안정성이 확보되지 않았고, 특히 절인부 가공에 있어서 코너처리 등에서 개선이 필요한 것으로 판단된다. 그러나 절삭과정의 전 영역에서 외산공구와 유사한 성능을 얻을 수 있어, 상기 언급한 점을 보완한다면 우수한 CBN 공구재료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 코팅 초경엔드밀의 추천 절삭영역에 포함되고, 경도가 HRC 40정도인 프리하든강(NAK80)의 절삭 시 발생하는 절삭력을 측정된 결과이다. NAK80은 냉간금형강에 비하여 경도가 비교적 낮은 반면, 취성이 있어 절삭이 어려운 재질에 속하는 것으로 알려져 있다.

그래프에서와 같이 STD 11의 절삭시험과 비교하여 모든 공구에서 절삭력이 비교적 작게 측정되었다. 이는 피삭재의 경도가 낮아 절삭 시 소요되는 저항이 작아지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 접선분력에서 CBN-D 공구의 절삭력이 가장 낮게 측정된 것을 제외하고, 모든 영역에서 초경공구의 절삭력이 가장 낮고 절삭력의 편차 및 공구마멸이 가장 작은 것으로 나타났다.

이는 프리하든강의 피삭재가 비교적 낮은 경도를 가진 반면 약간의 취성을 가지므로, 절삭 시 취성이 매우 큰 CBN 공구에는 미세한 치핑이 발생되고, 이러한 현상이 중첩되어 공구마모가 촉진되는 반면에, 초경공구는 비교적 큰 인성으로 인한 치핑의 발생이 억제되기 때문인 것으로 사료된다.

또한 CBN-B와 CBN-D의 비교에서는 앞서 언급한 바와 같이 자체 제작된 CBN-B의 품질이 불안정한 바에 기인하여 모든 절삭력 성분이 CBN-B에서 크게 측정되었다.

이러한 현상은 공작물의 표면거칠기 측정결과에서도 관찰할 수 있었다.

Fig. 10은 세 가지의 공구로 절삭력 측정이 끝난 상태에서 이송방향과 수직방향에 대하여 공작물 표면의 표면거칠기를 측정된 결과이다. 그림에서와 같이 비교적 낮은 경도인 NAK80의 표면거칠기는 초경공구와 CBN 공구의 값이 큰 차이가 없는 반면 STD-11의 표면거칠기는 절삭력 값이 크게 측정된 것과 동일한 이유로 매우 큰 값으로 측정되어 고경도강의 절삭에는 적합하지 않다는 것을 확인할 수 있었다.

다음의 Fig. 11은 냉간금형강의 절삭력 측정 후에 공구의

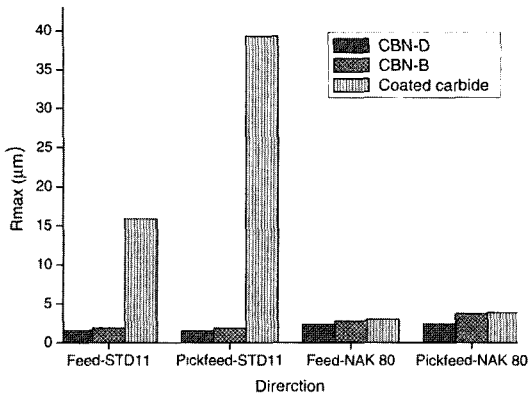


Fig. 10 Surface roughness of workpiece for each ball end mill(Magnitude : 2000)

인선을 나타낸 사진이다. 그림에서와 같이 CBN-B 볼 엔드 밀과 CBN-D 볼 엔드밀의 경우는 그림에서와 같이 공구마멸이 거의 발생하지 않았음을 볼 수 있었다.

마지막으로 절삭과정에서 발생된 칩을 관찰해 보면, 코팅 초경공구의 경우 냉간금형강의 절삭 시에는 공구마멸이 촉진되어 뜯김 현상에 의한 경작형 칩이 발생되어 표면거칠기를 증가시킨 반면, 프리하든강의 절삭에서는 전단형 칩이 생성되는 것을 볼 수 있었다.

또한 CBN-B 볼 엔드밀로 냉간금형강을 가공할 때 발생하는 칩의 형상은 냉간금형강의 재료특성이 고경도이며, 인성을 지니고 있기 때문에 절삭가공 중에 공구의 경사면을 따라 칩의 슬라이딩이 연속적으로 진행되어 절삭이 끝나는 부분까지 유동형 칩을 형성하게 되므로 공작물의 정밀표면을 얻을 수 있었다.

이에 비하여 프리하든강을 가공할 때 발생되어지는 칩의 형상은 인성을 줄이고 취성을 증가시킨 재료특성으로 인하여 절삭가공 중에 공구의 경사면을 따라 칩이 미끄러지면서 전단이 발생하므로 칩 배출은 용이하지만 공작물의 정밀표면가공성은 다소 떨어진다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 냉간금형용 합금공구강(STD11)과 프리하든강(NAK80)의 금형재료에 대해 절삭유제의 사용유무와 공구형상(경사각) 변화에 따른 CBN 볼엔드밀의 절삭성능과 마멸특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CBN 볼 엔드밀을 적용하여 건식절삭과 비수용성 절삭유를 사용한 경우를 비교할 때 절삭저항력은 건식절삭이 다소 높지만 거의 유사한 패턴을 나타냈으나, 표면거칠기는 비수용성 절삭유를 사용한 경우가 우수한 결과를 나타내었다.
- (2) 공구마멸의 형태는 비수용성 절삭유를 사용한 경우에는 용착에 의한 프랭크마멸이 주로 발생하였으며, 건식절삭의 경우에는 칩의 간섭에 의한 인선부의 치핑이 주로 발생하였다.
- (3) 공구형상에 있어서는 경사각이 0°, -15° -30°의 3가지 형상을 절삭성능 시험한 결과로서 -30°의 경사각을 갖는 CBN 볼 엔드밀이 절삭력의 절대적 크기가 가장 낮게 나타났으며, 공구마멸에 있어서도 우수한 성능을 나타내었다.

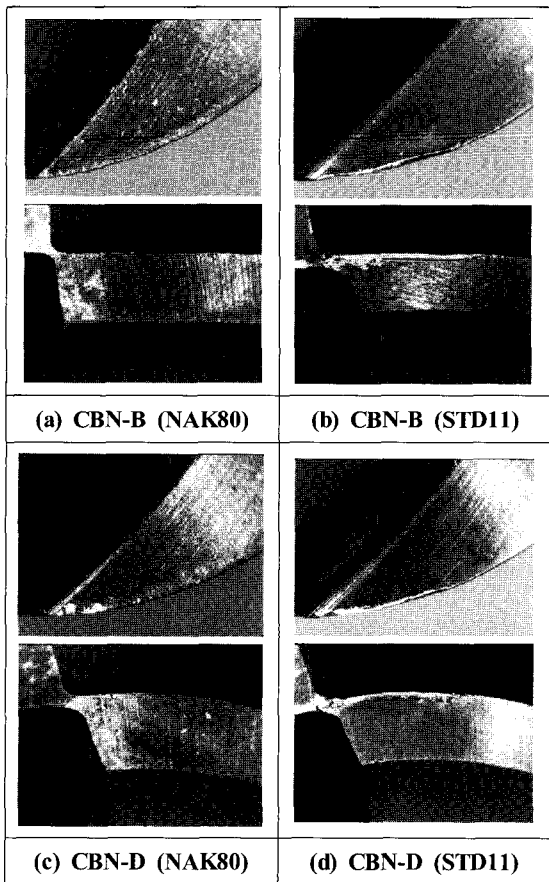


Fig. 11 Tool wear of each ball end mill after experiments

- (4) 절삭성능 평가 결과, 절삭력은 냉간금형강에서는 코팅 초경 볼 엔드밀이 3분력 모두 가장 높게 나타났으며, 프리하든강에서는 CBN 볼 엔드밀은 이송분력과 법선분력이 코팅 초경 볼 엔드밀보다 높았으나 접선분력은 코팅 초경 볼 엔드밀에 비해 낮게 나타났다.
- (5) 표면거칠기의 측정에서는 냉간금형강에서는 CBN 볼 엔드밀이 코팅 초경 볼 엔드밀에 비하여 매우 낮은 값으로 측정된 반면, 프리하든강에서는 거의 유사한 결과를 얻을 수 있어서 피삭재의 경도가 특히 높은 영역에서 CBN 공구의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Lee, D. W., Jeong, Y. H., Kang, M. C., Kim J. S. and Kim, S. W., 2000, "Advanced Machining Technology for Die Manufacturing," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 48-68.
- (2) Dewes, R. C. and Aspinwall, D. K., 1997, "A review of ultra high speed milling of hardened steels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 69, Iss. 1, pp. 1-17.
- (3) Scheffer, C., Kratz, H., Heyns, P. S. and Klocke, F., 2003, "Development of a tool wear-monitoring system for hard turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 10, pp. 973-985.
- (4) Kahles, J. F., Field, M. and Harvey, S. M., 1978, "High Speed Machining Possibilities and Needs," *Annals of the CIRP*, Vol. 27, pp. 551-560.
- (5) Lee, C. M., Choi, C. H., Ko, T. J., Chung J. Y. and Chung, W. J. 2003, "Selection of Machining Condition in High Speed Machining of STD11," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 8, pp. 30-38.
- (6) Mun, S. D. and Kim, T. Y., 2001, "Influence of CBN Tool Geometry on Cutting Characteristics of High Hardened Steel," *Journal of the KSMTE*, Vol. 10, No. 5, pp. 25-30.
- (7) Choi, J. G., Yang, Y. M. and Youn, J. W., 2001, "A Study on the Characteristic of Machined Surface by High Speed Ball End Milling," *Journal of the KSMTE*, Vol. 10, No. 6, pp. 126-134.
- (8) Lee, P. and Altintas, Y., 1996, "Prediction of Ball End Milling Force from Orthogonal Cutting Data," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 9, pp. 1059-1072.
- (9) Ikeda, T., Takahashi, I., Matsuoka, T. and Nakagawa, T., 1992, "Ultra High Speed Milling of Die Steel with Ball-nose End Mill," *The 2nd International Conference on Die and Mould Technology*, Singapore, pp. 48-56.
- (10) Kramer, B. M., 1987, "On Tool Materials for High Speed Machining," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 109, pp. 87-91.
- (11) Rahman, M., Kumar, A. S. and Salam, M. U., 2002, "Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 5, pp. 539-547.
- (12) Kang, M. C., Kim, J. S., Lee, D. W., Kim, K. H. and Ha, D. G., 2002, "Machinability Evaluation according to Variation of Endmill Shape for High Speed Machining," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 133-138.