

## CBN 볼 엔드밀의 절삭 및 마모특성에 관한 연구

(A Study on the Cutting Performance and Wear Characteristics of CBN Ball End-Mill)

이 기 우\*, 최 상 우\*, 김 호 성\*\*, 김 주 원\*\*, 이 중 찬\*\*\*

- \* 금오공과대학교 기계설계공학과 대학원
- \*\* 금오공과대학교 기계공학과 산업대학원
- \*\*\* 금오공과대학교 기계설계공학과

### ABSTRACT

This paper presents the experimental results on the cutting performance and wear characteristics of CBN ball end-mill. The influence of cutting fluids and rake angles on the tool performance is reported. It is found that the neat cutting oil is beneficial to obtain good surface roughness and 30° of rake angle gives the minimum tool wear. The microscopic investigations reveal that the coated carbide endmills wear by fracture whereas the CBN endmills wear by attritious mode.

Keywords : CBN endmill, mold making, cutting performance, wear

## 1. 서 론

공작기계를 이용한 금속의 절삭가공에 있어서 그 가공의 효율을 결정하는 가장 중요한 인자중의 하나는 절삭공구의 재질이다. 공작기계에 사용되는 절삭공구의 재료로는 그 동안 탄소공구강으로부터 시작하여 합금공구강, 고속도강, 소결탄화물, 그리고 세라믹에 이르기까지 꾸준히 발전하여 왔다. 그러나 산업의 발전과 더불어 피삭재는 점점 난삭화되어 가고 반면 가공속도는 점점 빠른 속도가 요구되고 있다. 이러한 요구를 만족시키는 공구재료의 필요성에 따라 1970년대에 Cubic Boron Nitride (이하 CBN)란 공구재료가 개발되었다.

CBN은 경도가 Knoop Hardness로 4000~5000 으로써 다이아몬드 다음가는 단단한 물질로 기준에 개발된 소결탄화물이나 세라믹보다 경도가 월등히 높다. CBN을 다이아몬드와 비교할 때 중요한 차이점은 다이아몬드는 원뿔한 경도에도 불구하고 절삭재료의 절삭에서는 탄소의 확산과 흑연화현상 때문에 효율적이지 못한 반면 CBN은 이러한 현상이 발생하지 않기 때문에 절삭재료의 절삭에 대해서도 효율적으로 사

용될 수 있다는 점이다. 또한 진공상태에서는 CBN과 다이아몬드 모두가 열적 안정성이 있지만 대기상태에서는 다이아몬드는 약 800℃이하의 온도에서만 열적안정성이 있는 반면 CBN은 1,300℃이상의 온도에서도 잘 산화되지 않는 뛰어난 열적 안정성을 지니고 있다.

본 연구에서는 이러한 우수한 기계적 성질을 지닌 CBN공구재를 밀링공구인 볼 엔드밀에 적용하여 몇가지 금형재료의 절삭가공시 CBN 공구재의 마모특성과 절삭성능을 규명하고 절삭유제가 표면조도에 미치는 영향 및 공구형상이 절삭성능에 미치는 영향 등을 연구하였다.

## 2. CBN공구재의 특성과 공구 및 공작물의 제작

Table 1은 CBN 공구재 및 주요 공구재의 물리적 특성을 나타내고 있으며 Table 1에서 보는 바와 같이 CBN의 물리적 성질이 다이아몬드 보다는 약간 뒤떨어지나 다른 공구재에 비하면 월등히 우수함을 볼 수 있다.

Table 1 Physical properties of CBN and major tool materials

	Density	Young's modulus ( $\times 10^9$ MPa)	Hardness (mHv) ( $\times 10$ MPa)	Thermal conductivity ( $\times 10^3$ W/mK)	Thermal expansion ( $\times 10^{-6}$ / $^{\circ}$ C)
Diamond	3.52	99	9,000	20.9	3.1
CBN	3.48	71	4,500	13.0	4.7
TiC	4.92	46	3,200	0.33	7.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.98	42	3,000	0.42	8.5
WC	15.8	70	1,800	1.21	5.1

본 연구에 사용한 공구로서는 CBN 소결체를 사용하여 제작한 두 종류의 CBN 볼 엔드밀(이하 CBN-A, CBN-B)과 비코팅공구로서 현재 시판되고 있는 CBN 볼 엔드밀(이하 CBN-C) 및 코팅층경 볼 엔드밀을 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 공구제의 구성성분을 나타낸 것이다.

Table 2 The compositions of tested cutting tools

	Diameter (mm)	Composition
CBN-A	10	c-BN(90%) + Co, Ni, Al
CBN-B	10	c-BN(50%) + Ti, Al
CBN-C	10	c-BN + WC, TiN, Al
COATED CARBIDE	10	WC + Co, TiC, TaC + Ti coating

실험에 사용된 공작물로는 현재 금형재료로 널리 사용되는 냉간 압형용 공구강(SKD-11, HRC50)과 프리하든강(NAK-80, HRC40)을 170L $\times$ 50W $\times$ 40H로 제작하여 실험을 행하였다. Table 3은 각 재료의 조성을 나타내고 있다.

Table 3 Chemical compositions of workpiece materials

	Chemical compositions (%)							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	P
SKD-11	1.51	0.39	0.58	12.2	1.03	0.34	0.47	-
NAK-80	0.12	0.29	-	-	-	-	3.15	0.021

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3-1 실험장치

볼 엔드밀의 절삭실험은 머시닝센터 (화천기계, ECOMIL 43V)를 사용하여 수행하였으며 고속가공을 위하여 주축속도 증속기를 사용하여 15,000 rpm까지 증속이 가능하도록 하였다. 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 (Metrabite, DAS-16)를 거쳐 디지털화되어 컴퓨터로 전송되었다. 컴퓨터에서는 Cutting Force Software를 사용하여 데이터를 분석하였다. Fig. 1은 이러한 절삭저항력 측정시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 공구의 마모는 칼라영상 현미경시스템을 이용하여 측정하고 SEM으로 관찰하였으며 공작물의 표면조도측정은 접촉식 표면조도계(Kosaka, SE-3F)를 사용하였다.

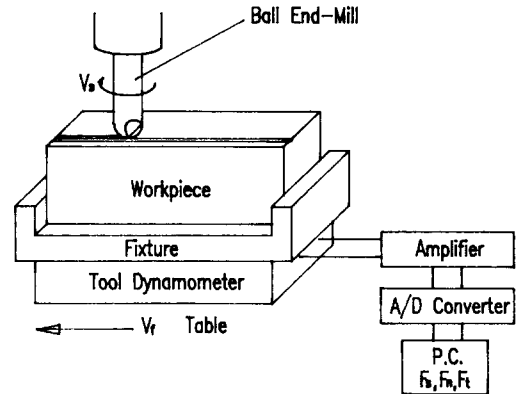


Fig. 1 Experimental system

#### 3-2 실험방법

본 연구에서는 실험을 3부분으로 나누어 실행하였다. 실험 1에서는 CBN-C 볼 엔드밀( $\phi$ 8)로 밀링작업시 절삭유체의 유무에 따른 절삭저항력과 표면거칠기변화를 조사하였으며, 실험 2에서는 CBN-A로 제작한 볼 엔드밀의 경사각(rake angle)의 변화에 따른 절삭저항력의 변화와 공구의 마모형상을 관찰하였다. 실험 3에서는 CBN-B로 제작한 CBN 볼 엔드밀과 CBN-C 볼 엔드밀 및 코팅층경 볼 엔드밀을 사용하여

각각의 절삭저항력, 마모형태, 표면거칠기 및 칩의 형상에 대해서 실험하였다.

Table 3은 각각의 실험에 대한 전삭조건을 나타낸 표이다.

Table 4 Cutting conditions

Cutting speed	5,000 rpm
Feedrate	0.04 mm/rev.
Pickfeed	0.2 mm
Depth of cut	0.2 mm
Cutting fluids	Neat cutting oil (Castrol, ILOCUT480)

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4-1 절삭유제가 절삭성능에 미치는 영향

실험 1에서는 CBN 불 엔드밀에 대하여 건식절삭 및 비수용성 절삭유를 사용했을 경우 절삭저항력 및 표면조도에 미치는 영향을 조사하였다. 공구로는 CBN-C의 불 엔드밀이 사용되어졌으며 공작물로는 SKD-11(HRC50)이 사용되어졌다. Fig. 2은 건식절삭 및 비수용성 절삭유를 사용한 경우의 절삭저항력을 비교한 그래프이다.

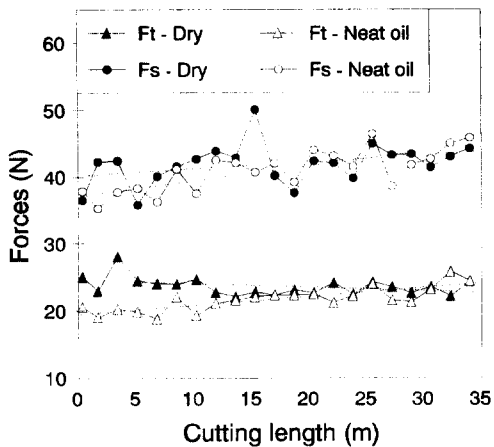


Fig. 2 Cutting forces vs. Cutting length for dry cut and neat cutting oil

Fig. 2에서 보는 바와 같이 절삭저항력은 이송분력(Fs) 및 칩분력(Ft)에 있어서 비수용성 절삭유를 사용한 경우가 절삭유제를 사용하지 않은 경우보다 약간 낮게 나타났다.

Fig 3는 전삭실험 후 두 경우에 대해서 공작물의 표면조도를 측정된 값을 비교한 것이고 Fig. 4는 각 경우의 공작물 표면의 형상을 나타낸 것으로서 비수용성절삭유를 사용한 경우가 건식으로 절삭한 경우보다 표면거칠기 및 공작물표면의 현상에 있어서 월등히 우수함을 볼 수 있다.

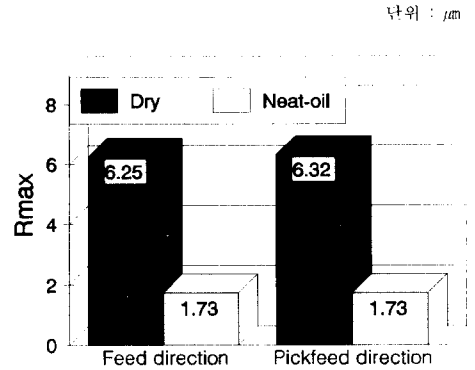


Fig. 3 Surface roughness of workpiece for dry cut and neat cutting oil

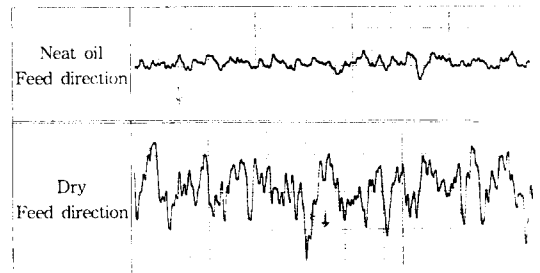


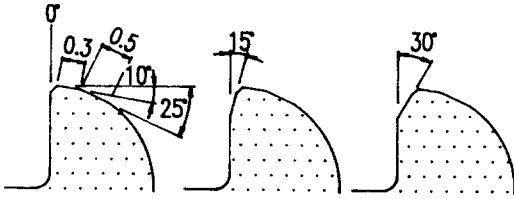
Fig. 4 Surface profiles of workpiece for dry cut and neat cutting oil

이러한 원인은 건식절삭의 경우에는 칩배출이 원활하지 않아 공작물과 공구사이에서 간섭을 일으켜 절삭면의 형상에 나쁜 영향을 미치고, 윤활성이 우수한 비수용성절삭유를 사용한 경우에는 칩이 절삭유를 따라 원활히 배출되어지고 절삭시 마찰을 줄여 주기 때문에 마모 및 절삭면의 형상에서도 우수하다고 고려되어진다.

##### 4-2 공구형상에 따른 절삭성능의 차이

본 실험에서는 CBN 불 엔드밀의 경사각(rake angle)이 절삭성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 경사각을 0도, 15도, 30도로 변화시키면서 절삭저항력과 공구마모에 미치는 영향

을 실험하였다. 실험공구로는 CBN-A로 제작한 CBN 볼 엔드밀을 사용하였으며 공작물로는 SKD-11(HRc50)을 사용하였다. Fig. 5는 실험에 사용된 각 볼 엔드밀의 형상을 나타낸 그림이다.



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

Fig. 5 Geometry of each CBN ball-end mill

Fig. 6은 공구의 경사각 0도, 15도, 30도에 대한 절삭저항력은 이송분력(Fs), 집진분력(Ft) 그리고 법선분력(Fn) 별로 비교한 것으로서 각 방향의 절삭저항력은 거의 같은 증가율을 보이고 있으나 rake angle 15도의 볼 엔드밀이 가장 절삭저항력이 높고 rake angle 30도의 CBN 볼 엔드밀이 가장 적은 힘이 걸리는 것을 볼 수 있다.

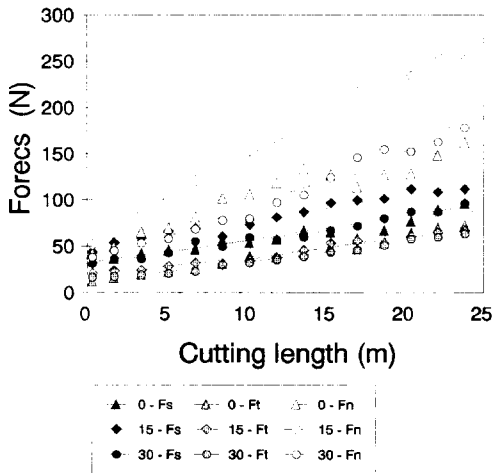


Fig. 6 Cutting forces vs. Cutting length for various rake angles

Fig. 7은 각 볼 엔드밀의 공구마모와 공작물표면의 형상을 나타낸 것이다. Rake angle 0도의 CBN 볼 엔드밀은 공구선

단의 절삭부에서 공구마모가 발생하였으며, rake angle 15도의 CBN 볼 엔드밀에서는 공구와 공작물의 경계면에서 경계마모가 발생하였음을 볼 수 있다. 반면 rake angle 30도의 CBN 볼 엔드밀에서는 공구마모가 거의 발생하지 않았음을 볼 수 있다. 이것은 CBN공구재가 경도가 높은 반면 인성이 약하다는 특징과 볼 엔드밀과 같이 충격횟수가 많은 단속절삭에 있어서는 절삭날의 칩핑(chipping)으로 인하여 공구마모가 발생되어지기 때문이다. 따라서 공구의 경사각을 네가티브 방향으로 하고 날끝을 챔퍼(chamfer)나 호닝(honing)처리를 함으로써 절삭날의 칩핑현상을 방지하고 공구의 강성을 향상시킬 수 있다고 생각되어진다.

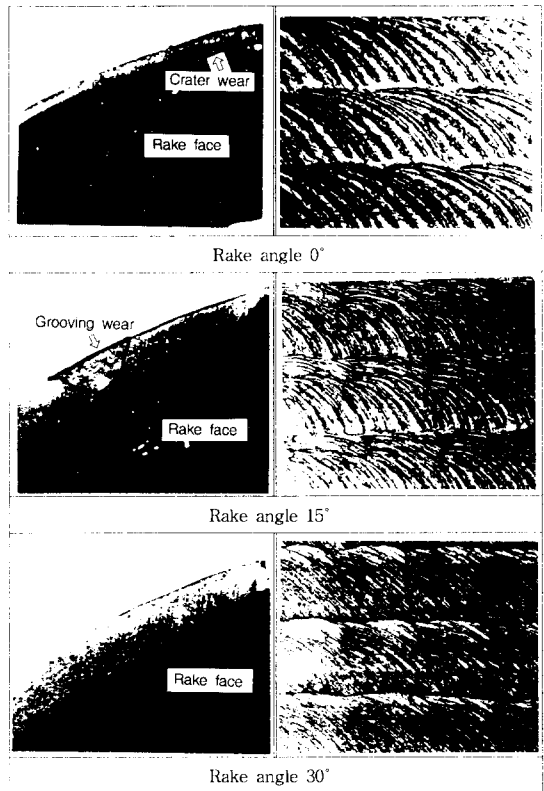


Fig. 7 Tool wear and workpiece surface for various rake angles

#### 4-3 CBN볼 엔드밀의 절삭성능과 마모특성

본 실험에서는 실험 1과 실험 2를 바탕으로 CBN-B, CBN-C 및 코팅층경 볼 엔드밀을 사용하였으며 공작물로서는 SKD-11(HRc50)과 NAK-80(HRc40)을 사용하였다.

Fig. 8은 각 볼 엔드밀로 SKD-11을 절삭할 때 발생하는 절삭저항력의 3분력의 값을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 코팅 초경 볼 엔드밀은 3분력의 절삭저항력 모두가 가장 높게 나타났으며 CBN-B 볼 엔드밀과 CBN-C 볼 엔드밀을 비교해 보면 이송분력(Fs)과 집선분력(Ft)의 값은 비슷하게 나타났으나 법선분력(Fn)값은 CBN-C 볼 엔드밀이 높게 나타났다.

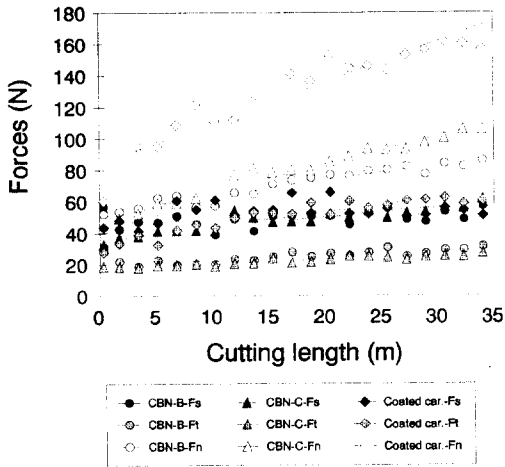


Fig. 8 Cutting forces vs. Cutting length for SKD-11 (HRC50)

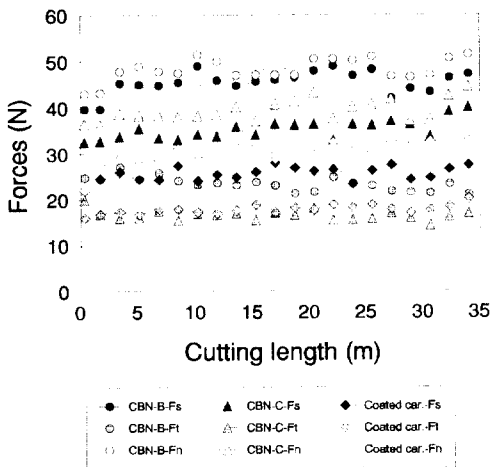


Fig. 9 Cutting forces vs. Cutting length for NAK-80 (HRC40)

Fig. 9는 각 볼 엔드밀로 NAK-80을 절삭할 때 발생하는 절삭저항력의 3분력의 값을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 절삭저항력의 측면에서는 CBN-C 볼 엔드밀, 코팅 초경 볼 엔드밀, CBN-B 순으로 작게 작용하였다.

Fig. 10은 각 볼 엔드밀로 절삭가공한후의 표면거칠기값을 비교한 것으로서 CBN-B 볼 엔드밀이 CBN-C 볼 엔드밀보다 약간 크게 나타났고 코팅 초경 볼 엔드밀은 CBN-B와 CBN-C 볼 엔드밀에 비해 표면거칠기값이 매우 크게 나타나 고경도강의 절삭에는 적합하지 않다는 것을 확인할 수 있었다.

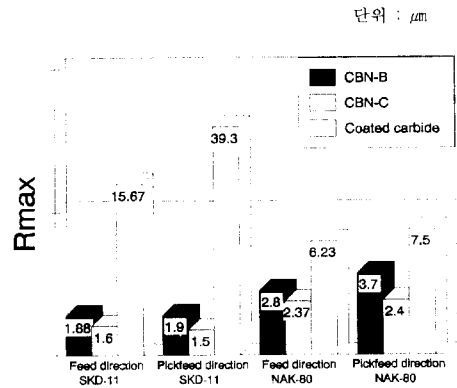


Fig. 10 Surface roughness of workpiece for each ball end-mill

Fig. 11은 코팅 초경 볼 엔드밀로 SKD-11과 NAK-80의 절삭실험후 발생한 공구마모를 나타낸 것으로 일관연과 피로 균열로 인하여 절삭날이 크게 파손된 것을 볼 수 있으며, Fig. 12는 이 때 발생한 절삭연과 반복되는 충격의 피로에 의한 균열을 나타낸 그림이고 Fig. 13은 코팅 초경 볼 엔드밀로 가공한 이송방향의 공작물 표면형상을 나타낸 것이다.

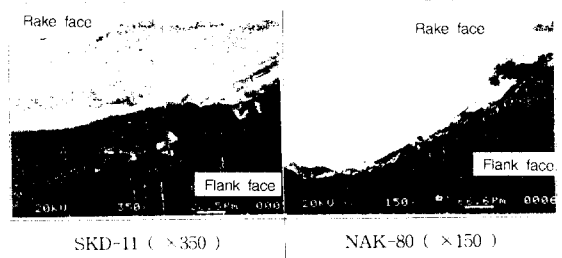


Fig. 11 Tool wear of coated carbide ball end-mill

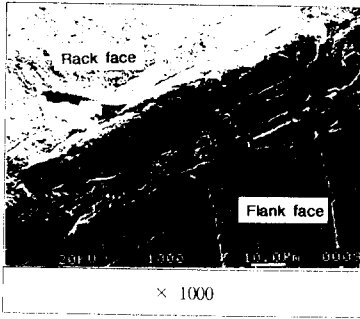


Fig. 12 Thermal and fatigue crack of coated carbide ball-end-mill

MAG. 2000

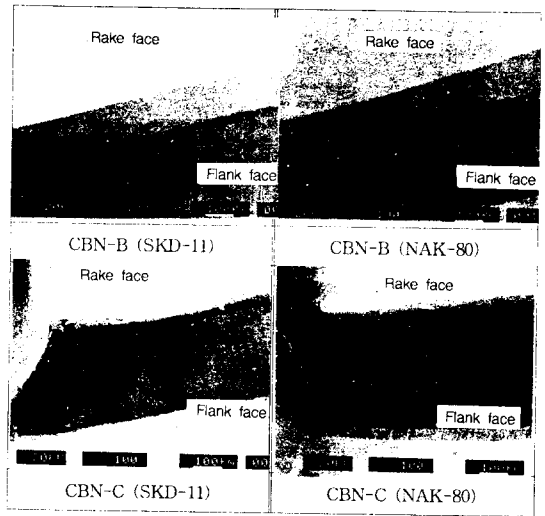


Fig. 14 Tool wear of each ball-end mill after experiments

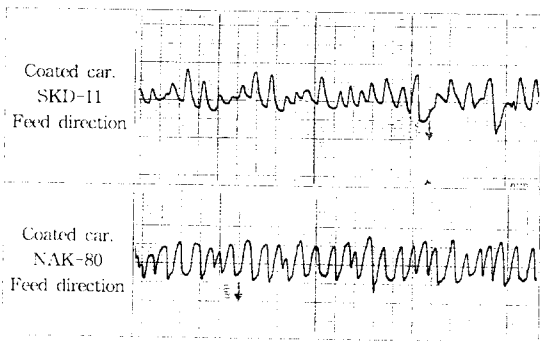


Fig. 13 Surface profiles of workpiece after experiments

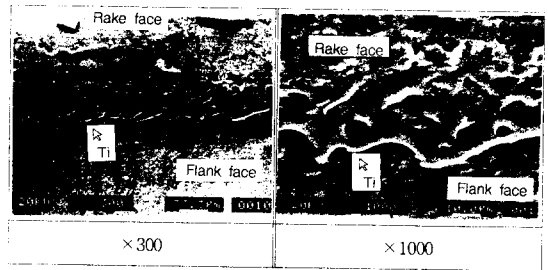


Fig. 15 Discharge of Ti in bonding phase of CBN tool

Fig. 14는 CBN-B 볼 엔드밀과 CBN-C 볼 엔드밀의 절삭 실험후 공구마모를 나타낸 것으로 양 경우 모두 공구마모가 거의 발생하지 않았음을 볼 수 있다. 그러나 CBN-B 볼 엔드밀로 NAK-80을 가공할 때 공구마모형상에 있어서 CBN공구재료의 결합제인 티타늄성분(Ti)이 소결 c-BN입자와의 결합상에서 공구선단의 절삭부로 빠져나오는 현상을 관찰할 수 있었다. Fig. 8과 Fig. 9에서 고경도재료인 SKD-11의 절삭시 CBN-B가 절삭저항력의 측면에서 우수하였음에도 불구하고 NAK-80의 절삭에서는 절삭저항력이 가장 높게 작용한 것은 이와 같이 c-BN 결합상에서 빠져나온 티타늄성분(Ti)이 구성인선(Built-up edge)의 역할을 하여 절삭저항력이 증가된 것으로 고려되어지며 c-BN입자와 결합제와의 결합상에서 티타늄성분(Ti)이 빠져 나오는 현상은 절삭가공중에 있어서 CBN공구재와 NAK-80의 구성성분이 화학작용을 일으키기 때문으로 고려되어진다. Fig. 15는 공구선단부의 절삭부에서 티타늄성분이 CBN공구재의 결합상에서 빠져나온 것을 SEM으로 관찰한 것이고 Fig. 16은 티타늄성분을 EDX 분석한 결과이다.

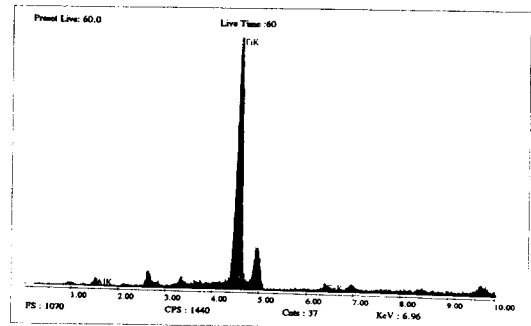


Fig. 16 X-ray diffraction pattern of Ti obtained from cutting edge of CBN tool

Fig. 17은 CBN-B 볼 엔드밀과 CBN-C 볼 엔드밀로 SKD-11과 NAK-80의 가공후 이송방향의 공작물표면형상을

나타낸 것으로 그림에서 볼 수 있듯이 CBN-C 불 엔드밀이 CBN-B 불 엔드밀보다 표면기질기가 약간 우수함을 볼 수 있다.

MAG. 5000

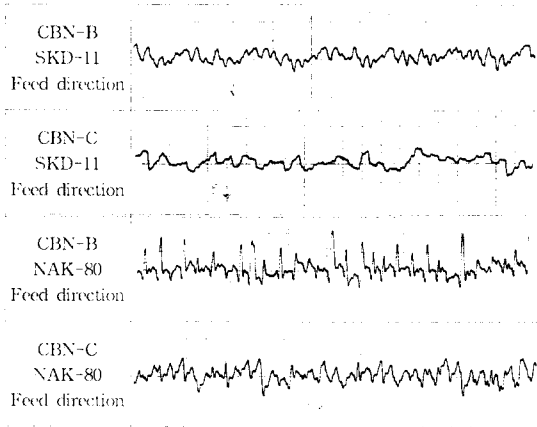


Fig. 17 Surface profiles of workpiece after experiments

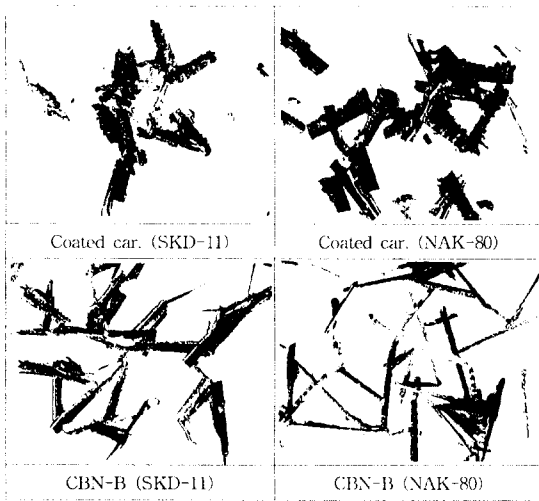


Fig. 18 Chips of each workpieces

Fig. 18은 코팅 초경 불 엔드밀과 CBN-B 불 엔드밀의 절삭가공시 발생하는 칩의 형상을 나타낸 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 코팅 초경 불 엔드밀로 SKD-11과 NAK-80을 가공할 때 발생되어지는 칩의 형상과 모양으로 인하여 뭉김현상으로 인한 칩이 생성되어진 것을 볼 수 있다. CBN-B 불 엔드밀로 SKD-11을 가공할 때 발생되어지는 칩의 형상은 SKD-11의 재료특성이 고경도이며 인성을 지니고 있기 때문

에 절삭가공중 공구의 경사면을 따라 칩의 슬라이딩(sliding)이 연속적으로 진행되어 절삭이 끝나는 부분까지 절삭날로서 유동형칩을 형성하게 되므로 공작물의 정밀표면을 얻을 수 있으며, NAK-80을 가공할 때 발생되어지는 칩의 형상은 인성을 높이고 취성을 증가시킨 재료특성으로 인하여 절삭가공중 공구의 경사면을 따라 칩의 슬라이딩(sliding)에서 칩단이 발생하므로 칩배출은 용이하나 SKD-11과 같이 불 엔드밀로서 공작물의 정밀표면가공성은 떨어진다.

## 5. 결 론

이상의 실험을 통하여 난삭재 금형재료에 대한 CBN 불 엔드밀의 절삭가공실험에 있어서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CBN 불 엔드밀을 이용한 절삭가공에서 건식절삭의 경우와 미수용절삭유를 사용한 경우를 비교할 때 절삭지향력인치의 비슷하게 나타났으나 표면기질기는 미수용절삭유를 사용한 경우가 월등히 우수하게 나타났다.

2) CBN 불 엔드밀의 절삭각형상에서는 네가티브 경사각 30도의 경우가 절삭지향력 및 공구마모에 있어서도 우수한 성능을 보였다.

3) CBN-B 불 엔드밀, CBN-C 불 엔드밀, 코팅 초경 불 엔드밀의 SKD-11(HRC50) 및 NAK-80(HRC40)에 대한 절삭성능 실험에서 코팅 초경 불 엔드밀은 고경도강( $\geq$ HRC40)의 절삭에 있어서는 적합하지 않다는 것을 확인하였으며, CBN-B 불 엔드밀은 NAK-80의 절삭에는 적합하지 않음이 확인되었다.