

CBN 볼 엔드밀의 최적 절삭조건에 관한 연구

최상우*, 이기우**, 이종찬***

A Study on the Optimum Cutting Conditions of CBN Ball Endmill

Sangwoo Choi*, Kiwoo Lee**, Jongchan Lee***

ABSTRACT

The needs to machine hardened steels with high productivity and good surface integrity have been increased in the dies & molds industry. This paper presents some experimental results on the CBN ball endmilling for hardened tool steel. This investigation concerns on the effects of cutting fluids, cutting speed, and feed on the cutting performance such as cutting forces, tool wear, and surface finish. The wear of CBN ball endmill for each cutting conditions were also examined through the microscopic observation. It has been found that the higher cutting speeds with cutting fluids result in better cutting performance.

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

1. 서론

절삭가공의 효율성을 결정하는 주요한 인자들로써는 피삭재의 재질, 가공조건, 공작기계의 강성, 절삭공구의 재질, 그리고 작업자의 숙련도 등을 들 수 있으나 신소재 공구의 개발은 절삭가공의 효율을 높이기 위해서 이루어야 할 필연적인 요소라 할 수 있다. 최근 금속산업의 발달로 난삭재가 출현함에 따라 금형가공업체나 기계가공업체에서는 가공시간의 단축, 가공정밀도의 향상, 제조원가의 절감 등을 위하여 난삭재를 가공할 수 있는 신소재 공구재료가 요구되어 왔고, 이러한 신소재 공구재료의 필요성에

의하여 인조다이아몬드와 CBN(입방정질화붕소)이 개발되어짐으로 난삭재의 절삭가공이 가능하게 되었다. 인조다이아몬드와 CBN의 중요한 차이점은 인조다이아몬드 공구는 철계재료의 절삭에는 적합하지 않지만 CBN은 철계재료의 절삭에 있어서도 안정성을 지닌다는 것이다⁽¹⁾.

최근에는 이러한 CBN공구재를 볼 엔드밀에 적용하여 금형강의 고속가공에 활용하고자 하는 연구들^{(2), (3)}이 이루어져 왔는데 그 동안의 연구결과들이 서로 다른 경우가 많았다. 특히 절삭속도의 증가에 따른 CBN 볼 엔드밀의 성능에 대하여 Ikeda는⁽⁴⁾ 절삭속도가 증가할수록 공구마모가 감소한다고 주장하고, Kramer⁽⁵⁾와 GE사⁽⁶⁾는 절삭

* 금오공과대학교 기계설계공학과 대학원
 ** 대우 고등기술연구원
 *** 금오공과대학교 기계설계공학과

속도가 증가할수록 공구마모가 증가된다고 주장하는 등 큰 차이를 나타내었고, 절삭유의 사용이 CBN 볼 엔드밀에 미치는 영향에 대해서도 Ikeda⁽⁴⁾와 GE사⁽⁶⁾에서의 연구결과가 상반되게 나타나는 등 CBN 볼 엔드밀의 현장 적용에 혼란스러운 결과가 발표되었다.

따라서 본 연구에서는 CBN 볼 엔드밀의 현장적용을 위하여 냉간금형용합금강(STD-11)의 절삭가공에 있어서 절삭유의 사용 유무와 절삭속도의 변화 및 CBN공구의 재종에 따른 절삭성능 및 마모특성을 규명하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 CBN 볼 엔드밀로 냉간금형용합금강(STD-11, HRC50)의 가공시 주축의 회전수를 여러 종류로 변화시켜 절삭속도의 변화에 따른 CBN 볼 엔드밀의 절삭성능 및 마모특성과 절삭유의 사용 유무가 공구의 절삭성능과 공구마모에 미치는 영향에 대해서 실험하였다. 실험에 사용된 공작기계로는 머시닝센터 (화천기계, ECOMIL 43V)가 사용되었으며 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 (IOtech, DaqBook)를 거쳐 디지털화되어 컴퓨터로 전송되었다. 컴퓨터에서는 Cutting Force Software를 사용하여 데이터를 분석하였다. Fig. 1은 이러한 절삭저항력 측정시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 공구마모는 갈라영상현

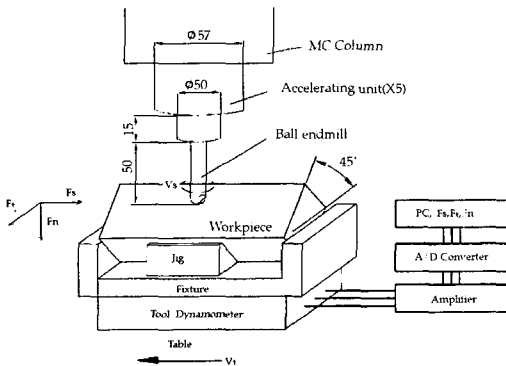


Fig. 1 Experimental system

미경시스템을 이용하여 측정하고 SEM (TOPCON, ADT-60)으로 관찰하였으며 공작물의 표면조도측정은 접촉식 표면조도계(Kosaka, SE-3F)를 사용하였다.

실험에 사용된 CBN 볼 엔드밀은 CBN 소결체를 사용하여 $\phi 10\text{mm}$ 로 제작하였으며, 실험에 사용된 공작물은 냉간금형용합금강(STD-11)을 170L×50W×50H로 제작한 뒤 로크웰 경도 HRC50으로 열처리하여 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 절삭유의 사용여부에 대한 실험결과

본 실험에서는 STD-11(HRC50)을 CBN 볼 엔드밀을 사용하여 절삭할 때 절삭유가 절삭성능과 공구마모에 미치는 영향을 규명하기 위하여 절삭유를 사용하지 않은 건식(Dry)의 경우와 비수용성 절삭유(Castrol, ILOCUT 480D)를 사용하여 평면절삭한 경우를 비교실험하였으며, 회전수는 5,000 rpm으로 하고, 이송속도는 200 mm/min로 하였다. 절삭깊이와 피크드 이송량은 각각 0.2 mm로 하였다. 본 실험에 사용된 CBN 볼 엔드밀은 CBN의 함유량이 90%이고, Co, Ni, Al 등의 결합제를 사용한 것이다.

(1) 절삭저항력

Fig. 2는 건식절삭과 비수용성 절삭유를 사용하여 절삭한 경우에 있어서 이송분력(F_s), 접선분력(F_t), 법선분력(F_n)을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 경우 모두 초기 절삭저항력은 비슷하나, 건식의 경우 초기 절삭저항력 증가가 뚜렷하며, 반면에 비수용성 절삭유를 사용한 경우는 초기 절삭력 증가가 완만함을 알 수 있다. 절

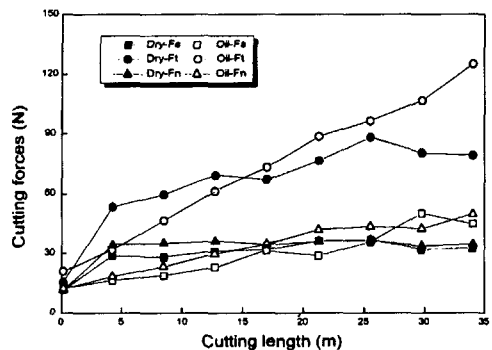


Fig. 2 Cutting force vs. Cutting length

삭길이가 증가할수록 절삭저항력은 비수용성 절삭유를 사용한 경우에 더 크게 나타나고 있다. 이는 건식절삭을 한 경우에 비수용성 절삭유를 사용하여 절삭한 경우보다 더 큰 프랭크마모를 나타내었고, 프랭크마모의 증가율 또한 비수용성 절삭유를 사용한 경우보다 훨씬 크게 나타났다. 따라서 건식절삭시 큰 프랭크마모로 인해 절삭공구의 가철면적은 증가하나 실제 절삭깊이는 감소로 인해 프랭크마모가 적은 비수용성 절삭유를 사용한 경우가 더 높은 절삭저항력을 나타내었다.

(2) 공구마모

Fig. 3은 건식절삭과 비수용성 절삭유를 사용한 경우에 대해서 영상현미경으로 프랭크 마모(flank wear)를 측정 한 것으로서 건식절삭을 한 경우에 프랭크 마모의 크기가 크고 그 증가율도 급격함을 알 수 있으며, 비수용성 절삭유를 사용한 경우에는 프랭크 마모의 증가율이 둔화되어 완만해짐을 알 수 있다.

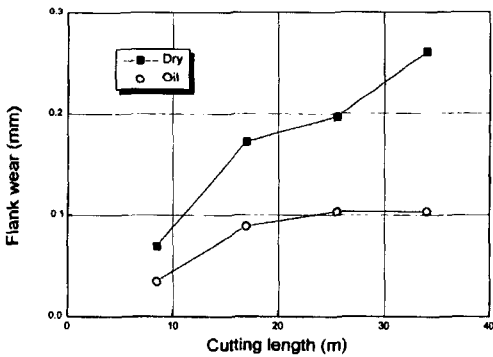


Fig. 3 Flank wear vs. Cutting length

Fig. 4는 34m 절삭후 공구마모를 관찰하기 위하여 SEM사진을 촬영한 것이다. 그림에서 프랭크 마모면을 보면 건식절삭의 경우 프랭크 마모면에 공작물이 많이 응착된 것과 이에 따른 큰 프랭크 마모를 볼 수 있고, 비수용성인 경우는 응착물이 적고 마모량도 적은 것을 알 수 있다. 이것은 건식절삭작업시 발생하는 열이 절삭유를 사용하는 경우보다 크기 때문이다.

(3) 공작물의 표면형상과 칩의 형상

Fig. 5는 34m 절삭후 비수용절삭유와 건식절삭시 공작물의 표면형상과 칩의 형상을 나타낸 것으로 비수용성 절삭유를 사용하여 절삭한 경우가 건식으로 절삭한 경우

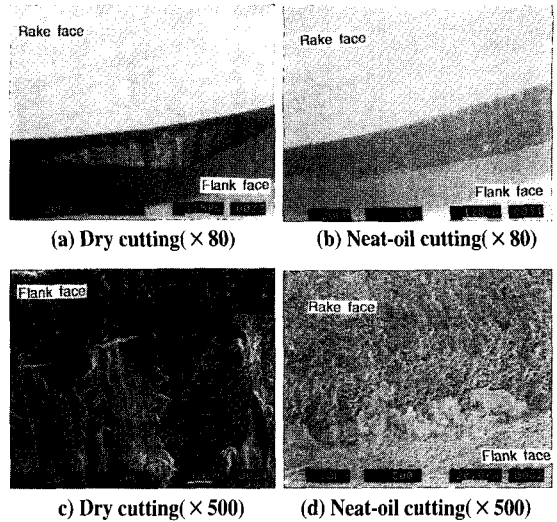


Fig. 4 Tool wear for Dry and Neat-oil cutting

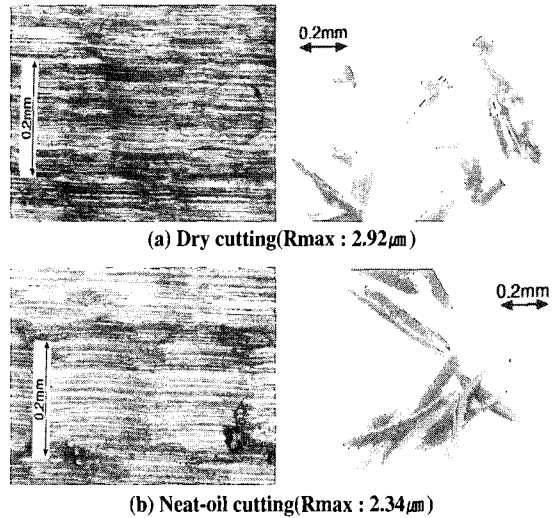


Fig. 5 Machined surface and chips for Dry and Neat-oil cutting (after 34m of cutting)

보다 우수하게 나타남을 볼 수 있다. 건식절삭의 경우에는 그림에서 볼 수 있듯이 칩이 잘게 부서진 형태로 발생하는 것과 공작물표면에 칩으로 인한 굽힘현상이 발생한 것으로 보아 절삭시 공구와 공작물사이의 칩의 간섭으로 인하여 프랭크 마모가 크게 일어났다는 것을 알 수 있다.

3-2 절삭속도의 변화에 대한 실험결과

본 실험에서는 D사의 CBN소결체를 사용하여 CBN 불

엔드밀을 제작하고 절삭길이를 34 m으로 길게하여 각각의 절삭속도에 대하여 절삭저항력, 공구마모, 표면거칠기 및 칩의 형상에 대하여 살펴보았다. Table 1은 장시간 절삭시의 절삭조건을 나타낸 것이다.

Table 1 Cutting conditions

Workpiece	STD-11 (HRC50)
Cutting speed/Feedrate (rpm / mm/min)	5,000/200
	8,000/320
	11,000/440
Pickfeed (mm)	0.2
Depth of cut (mm)	0.2
Cutting fluids	Neat-oil

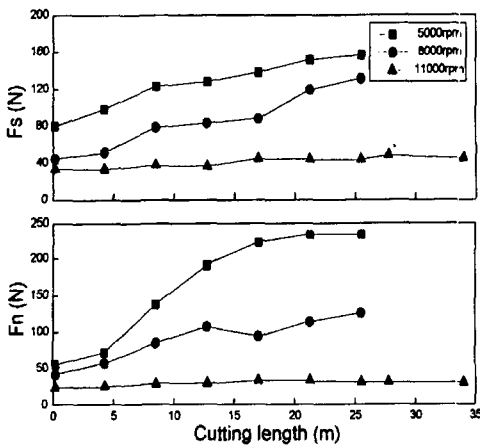


Fig. 6 Cutting force vs. Cutting length

(1) 절삭저항력

Fig. 6은 각 절삭속도의 변화에 따른 각각의 이송분력 (Fs), 배분력 (Fn)을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 3분력 모두에 있어서 5,000 rpm으로 절삭하였을 경우가 가장 높은 절삭저항력을 나타내었고 11,000 rpm으로 절삭한 경우가 가장 낮은 절삭저항력을 나타내었으며 절삭저항력의 증가율도 11,000 rpm의 경우가 가장 완만한 증가율을 보였다. 이와 같이 절삭저항력의 측면에서는 절삭속도가 높을수록 절삭저항력이 작게 작용하는 것으로 나타났다.

(2) 공구마모

Fig. 7은 각각의 절삭속도로 34 m 가공후의 공구마모

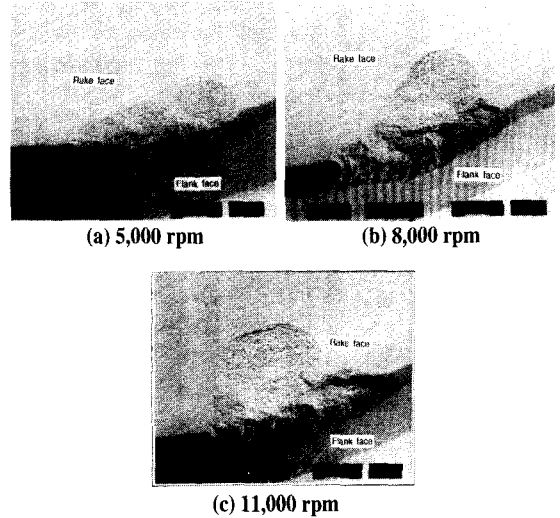


Fig. 7 Tool wear for each cutting speeds

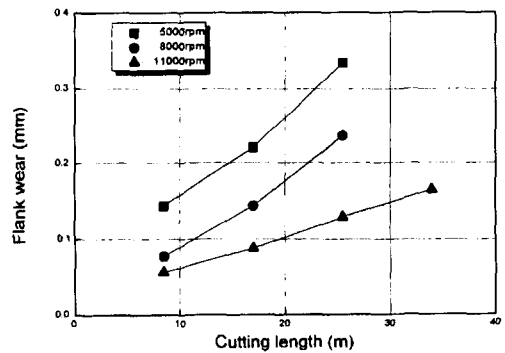


Fig. 8 Flank wear vs. Cutting length

를 전자주사현미경 (SEM)으로 촬영한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 공구수명을 결정하는 프랭크 마모 (flank wear)에 있어서 5,000 rpm으로 절삭한 경우가 가장 크게 나타났으며, 11,000 rpm으로 절삭한 경우가 가장 작게 나타났음을 볼 수 있다. Fig. 8의 프랭크 마모의 증가율에서도 5,000 rpm과 8,000 rpm의 경우에는 급격한 마모 증가율을 보이지만 11,000 rpm의 경우에는 완만한 증가율을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

(3) 공작물의 표면형상 및 칩의 형상

Fig. 9는 34m 절삭후 각각의 경우에 대한 공작물의 표면형상과 칩의 형상을 나타낸 것으로 절삭속도 11,000

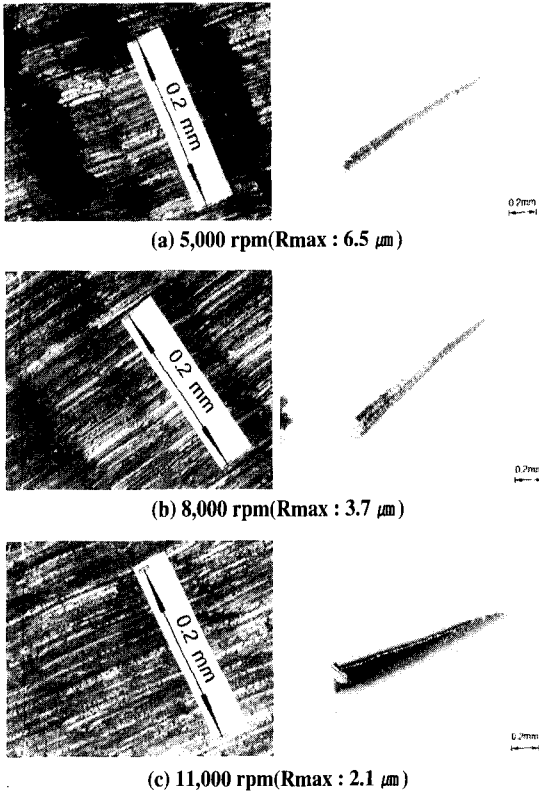


Fig. 9 Machined surface and Chips for each cutting speeds (after 34m of cutting)

rpm의 경우가 가장 우수한 표면형상을 나타냄을 볼 수 있고, 절삭속도가 낮을수록 공구인선부의 프랭크 마모로 인하여 미절삭부분이 존재함을 볼 수 있다. 칩의 형상에 있어서는 11,000 rpm시 발생하는 칩의 형태는 절삭시 칩이 공구의 경사면을 따라 절삭이 끝나는 부분까지 칩의 슬라이딩(sliding)이 연속적으로 진행되어지는 완전한 유동형칩이 생성되어지는 것을 볼 수 있으며, 8,000 rpm 시 발생하는 칩의 형태는 공구마모로 인하여 11,000 rpm보다는 칩의 폭이 작은 형태를 나타내고 있다. 5,000 rpm시 발생하는 칩의 형상은 프랭크 마모의 급격한 증가로 11,000 rpm과 8,000 rpm의 경우보다 칩의 폭이 매우 작으며 공구경사면에서 칩의 슬라이딩시 전단 이 발생한 형태를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

3-3 CBN 재종에 따른 실험결과

본 실험에서는 STD-11(HRc50)을 결합제가 서로 다른 CBN 불 엔드밀로 절삭 가공할 때 CBN의 재종이 절

삭성능과 공구마모에 미치는 영향을 규명하기 위하여 회전수 11,000rpm으로 하고 이송속도 440mm/min, 절삭 깊이와 피피드 이송량은 0.2mm로하여 각 불 엔드밀을 비교실험하여 절삭저항력, 공구마모, 표면거칠기 및 칩의 형상에 대하여 살펴보았다. Table 2는 각각의 CBN 불 엔드밀의 구성 성분을 나타낸 것이다.

Table 2 The compositions of tested cutting tools

Tool type	Compositions
CBN1	c-BN(50%) + TiC, Al, etc
CBN2	c-BN(60%) + TiN, WC, Al, etc
CBN3	c-BN(60%) + ceramic ets
CBN4	c-BN(80%) + TiN, Al etc
CBN5	c-BN(90%) + Co, Ni, Al etc

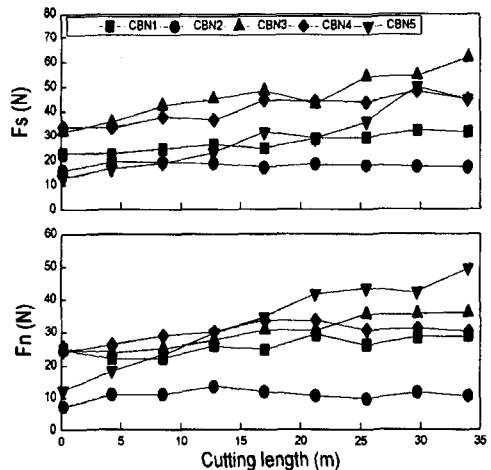


Fig. 10 Cutting force vs. Cutting length

(1) 절삭저항력

Fig. 10은 각 결합제의 변화에 따른 각각의 이송분력 (Fs), 법선분력(Fn)을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 CBN2의 경우가 가장 낮게 나타나고 있으며 완만한 증가율을 보이고 있고, CBN3의 경우가 상대적으로 높은 절삭저항력을 나타내고 있다. 이와 같이 절삭저항력 측면에서 볼 때 c-BN 입자의 함유량이 60%이고 TiN 결합제를 사용한 경우에 낮은 절삭저항력을 보여주고 있다.

(2) 공구마모

Fig. 11은 각각의 CBN 볼 엔드밀로 가공시 프랭크 마모의 진행을 측정 한 것으로서 CBN4는 프랭크 마모의 크기가 크고 그 증가율도 급격함을 알 수 있으나 CBN1, CBN3와 CBN5는 프랭크 마모의 증가율은 아주 완만하다. 특히 CBN2는 거의 프랭크 마모가 발생하지 않았음을 알 수 있다. Fig. 12는 34m 가공후의 공구마모를 전

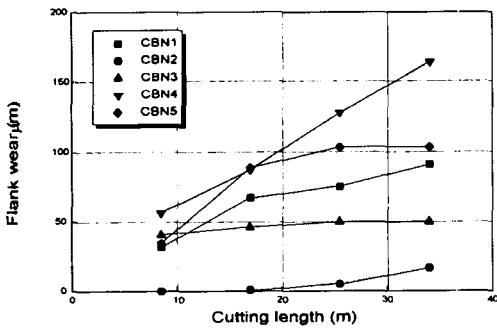


Fig. 11 Flank wear vs. Cutting length

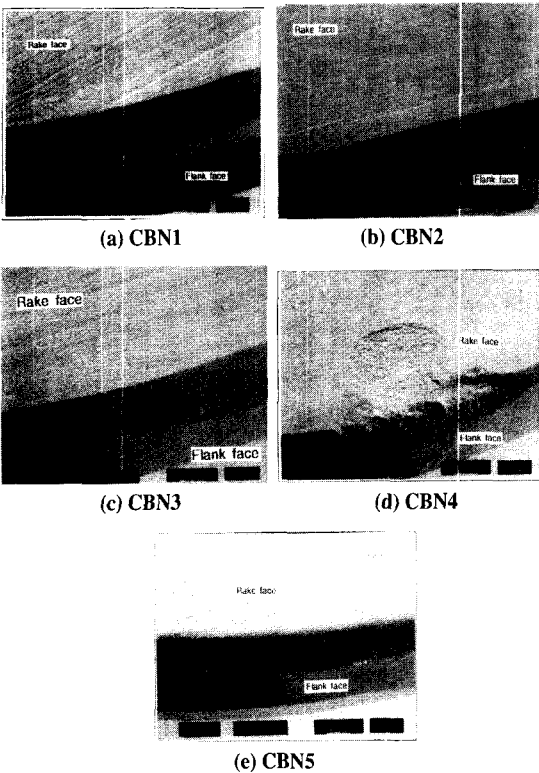


Fig. 12 Tool wear for each cutting tools

자주사현미경(SEM)으로 촬영한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 공구수명을 결정하는 프랭크 마모의 크기에서 CBN4가 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

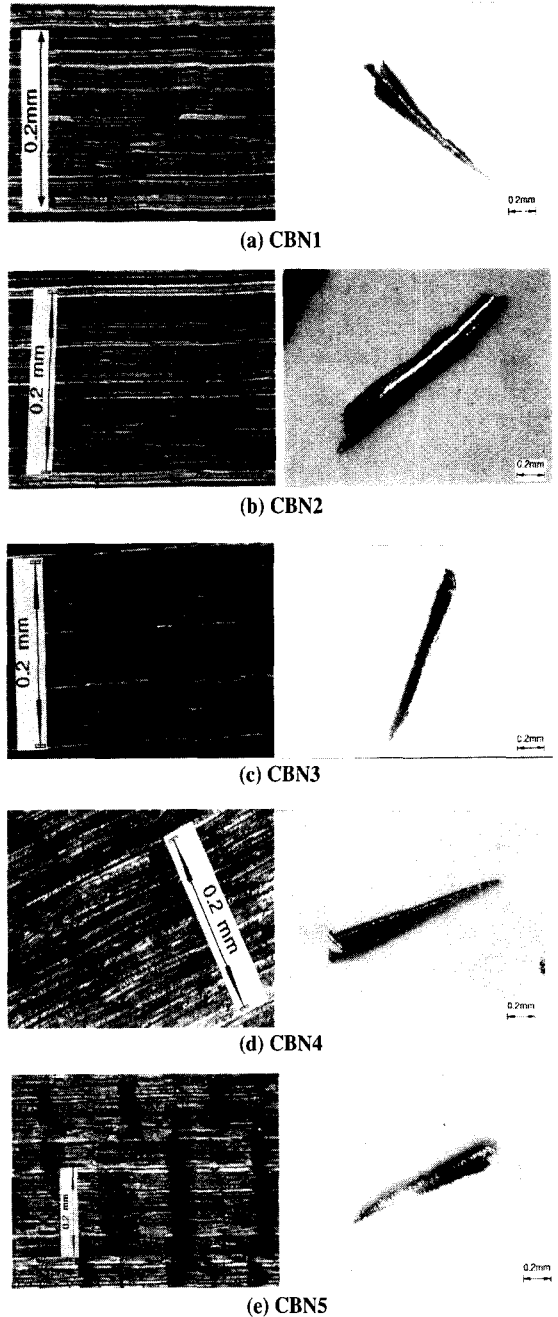


Fig. 13 Machined surface and Chips for each cutting tools (after 34m of cutting)

(3) 공작물의 표면형상 및 칩의 형상

Fig. 13은 34m 절삭후 각각의 경우에 대한 공작물의 표면형상과 칩의 형상을 나타낸 것으로 CBN2의 경우가 가장 우수한 표면형상을 나타냄을 볼 수 있고, TiN 결합제와 c-BN 입자의 함유량이 60%인 경우가 우수함을 알 수 있다. 세라믹 결합제를 사용한 경우 다른 결합제를 사용한 경우보다 공구인선부의 프랭크 마모로 인하여 미소한 미절삭부분이 존재함을 볼 수 있다. 칩의 형상에 있어서는 CBN2의 경우에 발생하는 칩의 형태는 절삭시 칩이 공구의 경사면을 따라 절삭이 끝나는 부분까지 칩의 슬라이딩(sliding)이 연속적으로 진행되어지는 완전한 유동형 칩이 생성되어지는 것을 볼 수 있으며, 다른 경우에도 유선형의 칩이 생성되나 CBN2의 경우보다 칩의 폭과 길이가 짧은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이상으로 절삭유류의 사용여부와 절삭속도의 변화 및 CBN재종에 따른 CBN 볼 엔드밀의 절삭성능과 마모특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 절삭유류의 사용여부에 따른 실험에서는 비수용성 절삭유를 사용한 경우가 건식절삭의 경우보다 절삭저항력, 공구마모, 가공면의 표면형상 등 모든 면에서 우수한 성능을 나타내었다.
2. 건식절삭의 경우 절삭구역의 온도상승으로 인하여 공구날 끝에 공작물이 많이 응착되었고, 이것은 공구마모로 이어져 건식절삭의 경우가 절삭유를 사용한 경우보다 공구의 마모가 크게 나타났다.
3. 절삭속도의 변화에 따른 실험에서 본 실험범위인 주축속도 11,000 rpm까지에서는 절삭속도가 증가할수록 절삭저항력이 감소하고 그 증가율도 작게 나타났으며 표면거칠기 또한 향상되었다.

4. c-BN 입자의 함유량을 다르게하여 가공할 때 그 함유량이 60%이고 TiN 결합제를 사용한 경우에 있어서 절삭저항력이 가장 낮고 그 증가율도 작게 나타났으며 표면거칠기와 공구마모 등도 우수하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정 연구과제 (과제번호 : 94-0200-05-01-3)의 일부로 수행되었습니다. 동 재단의 관계자분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 大河出版, "工具材種の選びがた使い方", No. 11, pp. 90~93, 1994.
2. 이기우, 최상우, 김주원, 김호성, 이종찬, "CBN 볼 엔드밀의 절삭 및 마모특성에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.107-113, 1996.
3. 이기우, 최상우, 이종찬, "CBN 재종에 따른 볼 엔드밀의 특성에 관한 연구", 금오공과대학교 생산기술연구소 논문집, Vol. 12, pp. 81~91, 1996.
4. T. Ikeda, et al, "Ultra High Speed Milling of Die Steel with Ball-nose Endmill", The 2nd International Conference on Die & Mould Technology, Singapore, Sept. 1992.
5. B. M. Kramer, "On Tool Materials for High Speed Machining", Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, May 1987.
6. "PCBN을 이용한 철계재료의 밀링", 기계기술, Feb. 1996.