

CBN 볼 엔드밀의 최적 절삭조건에 관한 연구- I

A Study on the Optimum Cutting Conditions of CBN Ball Endmill- I

이 기 우, 최 상 우(금오공대 대학원), 이 종 찬(금오공대), 강 추 욱(대한중석)

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 speed and cutting fluids 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 out 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. 서 론

절삭가공의 효율성을 결정하는 주요한 인자들로써 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, 가공정밀도 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 인조다이아몬드공구는 철계재료의 절삭에는 적합하지 않지만 CBN은 철계재료의 절삭에 있어서도 안정성을 지닌다는 것이다.

최근에는 이러한 CBN공구재를 볼 엔드밀에 적용하여 금형강의 고속가공에 활용하고자 하는 연구들이 이루어져 왔는데 그 동안의 연구결과들이 서로 다른 경우가 많았다. 특히 절삭속도의 증가에 따른 CBN 볼 엔드밀의 성능에 대하여 Ikeda는⁽¹⁾ 절삭속도가 증가할수록 공구마모가 감소한다고 주장하고

Kramer⁽²⁾와 GE사⁽³⁾는 절삭속도가 증가할수록 공구마모가 증가된다고 주장하는 등 큰 차이를 나타내었고, 절삭유의 사용이 CBN 볼 엔드밀에 미치는 영향에 대해서도 Ikeda⁽¹⁾와 GE사⁽³⁾에서의 연구결과가 상반되게 나타나는 등 CBN 볼 엔드밀의 현장적용에 혼란스러운 결과가 발표되었다.

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

2. CBN 공구재의 특성

CBN(cubic boron nitride)은 천연에 존재하지 않는 인공재료로서 화학적, 열적으로 안정하며 다이아몬드와 유사한 특성을 가지고 있는 재료이다. 그러나 다이아몬드와 CBN을 비교할 때 중요한 차이점은 다이아몬드는 비철계재료의 절삭에 있어서는 우수한 성능을 나타내지만 철계재료의 절삭에 있어서는 월등한 경도(약 10,000 kg/mm²)에도 불구하고 탄소의 확산과 흑연화현상 때문에 심한 공구마모가

발생하여 효율적이지 못한 반면, CBN은 경도가 약 $1,700 \text{ kg/mm}^2$ 로서 다이아몬드보다는 낮지만 철계 재료에 대하여 흑연화현상이 발생하지 않기 때문에 철계재료의 절삭에 대해서도 효율적으로 사용될 수 있다는 점이다. 또한 진공상태에서는 CBN과 다이아몬드 모두가 열적 안정성이 있지만 대기상태에서는 다이아몬드는 약 800°C 이하의 온도에서만 열적 안정성이 있는 반면 CBN은 $1,300^\circ\text{C}$ 정도의 온도에서도 잘 산화되지 않는 뛰어난 열적 안정성을 지니고 있다. Table 1은 CBN공구재와 타 주요공구재의 물리적 특성을 비교한 것이다. Table 1에서 볼 수 있듯이 CBN공구재는 인조다이아몬드에 비해서는 물리적 특성이 약간 뒤떨어지나 타공구재에 비해서는 월등히 우수한 성질을 나타냄을 알 수 있다.

이러한 우수한 기계적 성질을 지닌 CBN공구는 초기에는 주로 고경도강을 연삭가공하는 지식의 지립으로 널리 사용되어졌으나 1970년대에 c-BN분말과 결합재를 초고압 고온하에서 소결한 CBN소결체가 개발된 이래 고경도의 담금질강, 주철, 내열합금, 롤 등의 철계 난삭재의 절삭가공용으로 널리 사용되기에 이르렀다.

Table 1 Physical properties of CBN and other major tool materials

	Density	Young's modulus ($\times 10^5 \text{MPa}$)	Hardness (mHv) ($\times 10 \text{MPa}$)	Thermal conductivity ($\times 10^2 \text{W/mK}$)
Diamond	3.52	99	9,000	20.9
CBN	3.48	71	4,500	13.0
TiC	4.92	46	3,200	0.33
Al_2O_3	3.98	42	3,000	0.42
WC	15.8	70	1,800	1.21

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 CBN 볼 엔드밀로 냉간 금형용 합금강(STD-11, HRC50)의 가공시 주축의 회전수를 여러 종류로 변화시켜 절삭속도의 변화에 따른 CBN 볼 엔드밀의 절삭성능 및 마모특성과 절삭유 의 사용 유무가 공구의 절삭성능과 공구마모에 미치는 영향에 대해서 실험하였다. 실험에 사용된 공작기계로는 머시닝센터 (화천기계, ECOMIL 43V)가 사용되었으며 고속가공을 위하여 주축속도 증속기를 사용하여 $15,000 \text{ rpm}$ 까지 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 칼라영상현미경시스템을 이용하여 측정하고 SEM (TOPCON, ADT-60)으로 관찰하였으며 공작물의 표면조도측정은 접촉식 표면조도계 (Kosaka, SE-3F)를 사용하였다.

실험에 사용된 CBN 볼 엔드밀은 DBC80소결체를 사용하여 $\phi 10 \text{mm}$ 으로 제작하였으며, DBC80의 성분으로는 c-BN입자의 함유량이 80 %이고 세라믹 결합제를 사용한 것이다. 실험에 사용된 공작물은 냉간금형용 합금강(STD-11)을 $170 \text{L} \times 50 \text{W} \times 50 \text{H}$ 으로 제작한 뒤 로크웰 경도 HRC50으로 열처리하여 사용하였다.

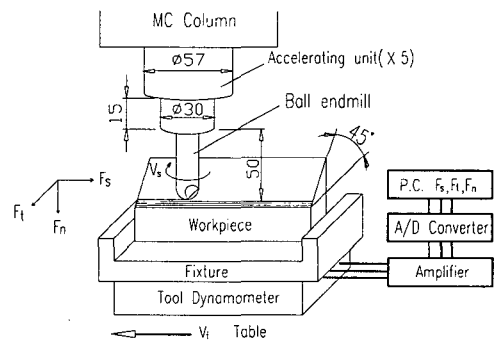


Fig. 1 Experimental system

4. 실험결과 및 고찰

4-1 절삭속도의 변화에 대한 실험결과

[1] 평면을 slotting으로 단시간 가공한 경우

본 실험은 STD-11(HRC40)을 S사의 CBN 볼 엔드밀을 사용하여 평면 slotting 절삭으로 하였으며 $3,000 \text{ rpm}$ 에서 $13,000 \text{ rpm}$ 까지 변화시키며 실험하였다. 절입깊이는 0.2 mm 로 하고 날당 이송량은 0.02 mm 로 일정하게 하였으며, 비수용성 절삭유를 사용하였다.

Fig. 2는 절삭속도 증가에 대한 절삭저항력의 변화와 표면거칠기를 측정된 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 3분력 모두에 대해서 절삭속도가 증가할수록 절삭저항력이 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있고 절삭속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 향상되어짐을 알 수 있다.

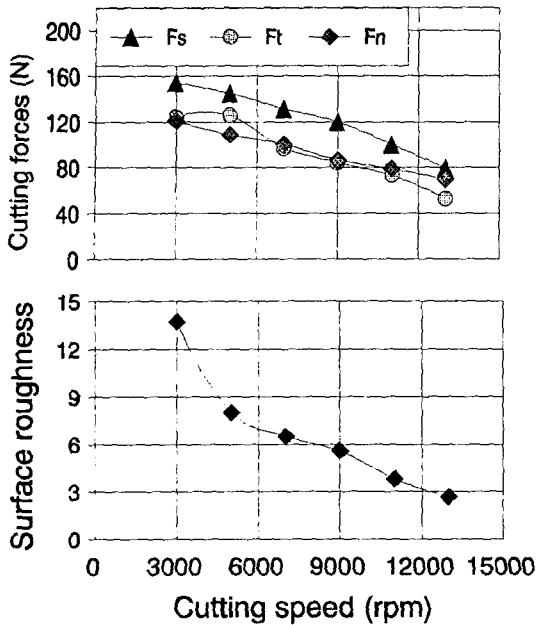


Fig. 2 Cutting force and Surface roughness (Rmax) vs. Cutting speed

[2] 경사면 절삭을 장시간 한 경우

본 실험에서는 D사의 CBN소결체를 사용하여 CBN 볼 엔드밀을 제작하고 절삭길이를 34 m로 길게하여 각각의 절삭속도에 대하여 절삭저항력, 공구마모, 표면거칠기 및 칩의 형상에 대하여 살펴보았다. Table 2는 장시간 절삭시의 절삭조건을 나타낸 것이다.

Table 2 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

(1) 절삭저항력

Fig. 3은 각 절삭속도의 변화에 따른 각각의 이송분력(Fs), 접선분력(Ft), 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.

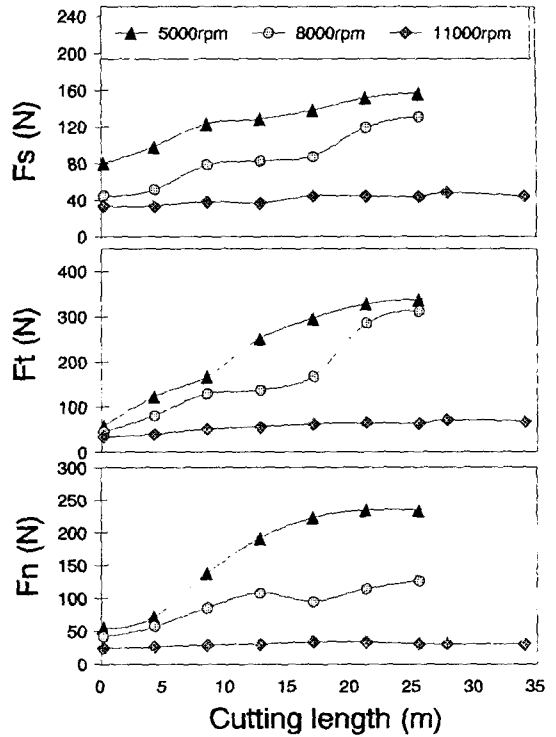


Fig. 3 Cutting force vs. Cutting length

(2) 공구마모

Fig. 4는 각각의 절삭속도로 34 m 가공후의 공구마모를 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. 5의 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. 6은 각 경우에 대한 공작물의 표면형상과 칩의 형상을 나타낸 것으로 절삭속도 11,000 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 rpm시 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 전단이 발생한 형태를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

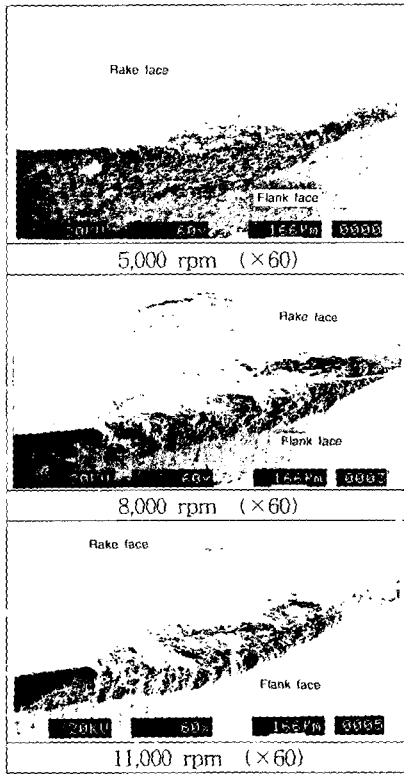


Fig. 4 Tool wear for each cutting speeds

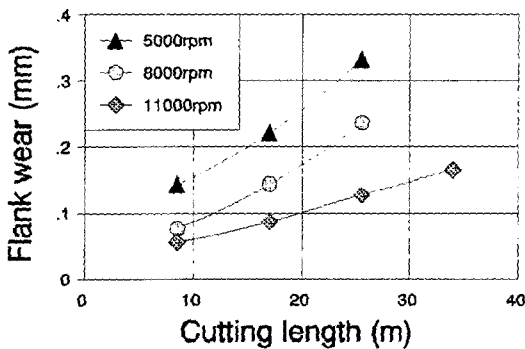


Fig. 5 Flank wear vs. Cutting length

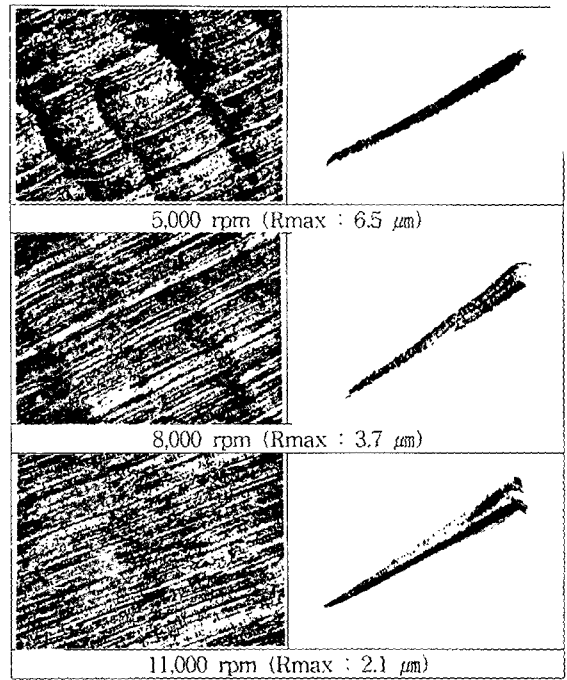


Fig. 6 Machined surface and Chips for each cutting speeds

4-2 절삭유의 사용여부에 대한 실험결과

본 실험에서는 STD-11(HRc50)을 CBN 불 앤드 밀을 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. 절입깊이와 피피드 이송량은 각각 0.2 mm로 하였다.

Fig. 7은 건식절삭과 비수용성 절삭유를 사용한 경우에 있어서 공구마모의 형상을 나타낸 것으로 그림에서 볼 수 있듯이 건식절삭의 경우에는 공구선단부에 파괴에 의한 결손이 발생하였음을 볼 수 있고, 비수용성 절삭유를 사용한 경우에 있어서는 점진적인 마모에 의한 프랭크 마모가 발생하였음을 볼 수 있다.

Fig. 8은 비수용성 절삭유를 사용하여 절삭할 때 발생한 프랭크 마모부위를 500배로 확대한 사진으로 프랭크 마모면에 금속이 응착된 것을 볼 수 있는데 이것은 Fig. 8의 EDX분석에서 확인된 바와 같이 피삭재가 응착된 것이다. 그리고 CBN의 마모면을 관찰하여 보면 CBN grain들이 떨어져 나간 것을 볼 수 있다. 따라서 비수용성 절삭유를 사용한 절삭에서의 공구마모는 주로 응착마모(adhesive wear)에 의하여 발생하는 것을 알 수 있다. 건식절삭의 경우

에는 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 칩이 잘게 부서진 형태로 발생하는 것과 공작물표면에 칩으로 인한 긁힘 현상이 발생한 것으로 보아 절삭시 공구와 공작물사이의 칩의 간섭으로 인하여 공구선단부가 파손되어진 것으로 판단된다.

Fig. 9는 비수용절삭유와 건식절삭시 공작물의 표면형상과 칩의 형상을 나타낸 것으로 비수용성절삭유를 사용하여 절삭한 경우가 건식으로 절삭한 경우보다 우수하게 나타남을 볼 수 있다.

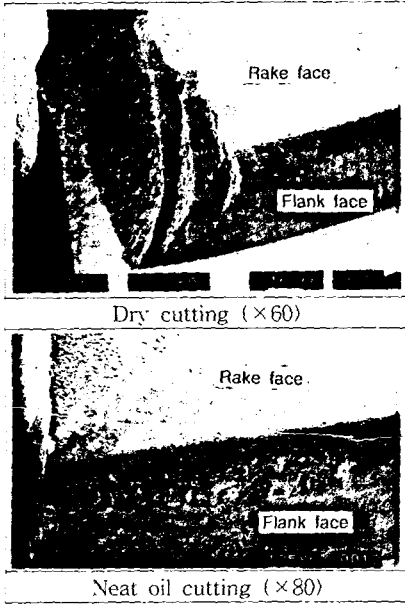


Fig. 7 Tool wear for Dry and Neat oil cutting

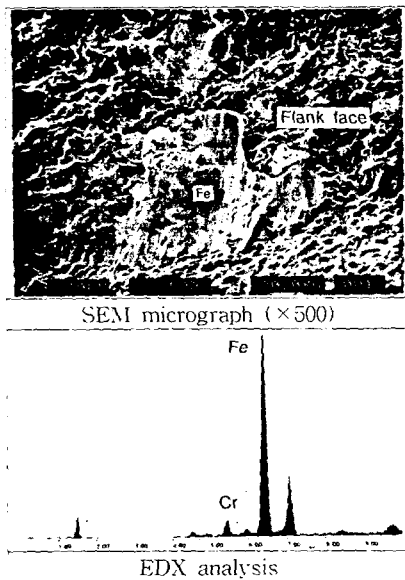


Fig. 8 SEM and EDX analysis of tool edge for Neat oil cutting

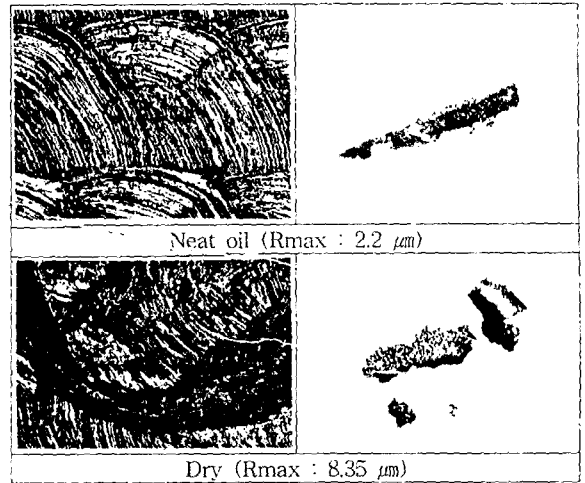


Fig. 9 Machined surface and chips for Dry and Neat oil cutting

4. 결 론

이상으로 절삭속도의 변화와 절삭유의 사용여부에 따른 CBN 볼 앤드밀의 절삭성능과 마모특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 평면 slotting으로 단시간 가공시 절삭속도변화에 대하여, 본 실험범위인 주축회전수 13,000 rpm까지에서 절삭저항력은 절삭속도가 증가할수록 감소되는 것으로 나타났고, 표면거칠기도 절삭속도가 증가할수록 향상되는 것으로 나타났다.

2. 경사면을 장시간 가공시 절삭속도의 변화에 따른 실험에서도 본 실험범위인 주축속도 11,000 rpm까지에서는 절삭속도가 증가할수록 절삭저항력이 감소하고 그 증가율도 작게 나타났으며 표면거칠기 또한 향상되었다.

3. 절삭유의 사용여부에 따른 실험에서는 비수용성 절삭유를 사용한 경우가 건식절삭의 경우보다 우수한 성능을 나타내었다.

4. 공구마모의 형태는 비수용성 절삭유를 사용한 경우에는 응착마모에 의한 프랭크 마모가 주로 발생하였고, 건식절삭의 경우에는 칩의 간섭에 기인한 절삭날의 파손이 주로 발생하였다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. B. M. Kramer, "On Tool Materials for High Speed Machining", Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, May 1987.
3. "PCBN을 이용 철계재료의 밀링", 기계기술, Feb. 1996.