

## CBN공구의 마모에 관한 실험적 연구

권 오 철\*, 이 종 찬\*\*

### Experimental Investigation on the Wear Mechanism of CBN Cutting Tools

O-chul Kwon\*, Jong-chan Lee\*\*

#### ABSTRACT

An experimental investigation is reported on the wear mechanism of CBN cutting tools. The cutting experiments were conducted on a lathe equipped with a tool dynamometer for cutting force measurement. The investigation of wear mechanism was executed by observing the worn tools using tool microscope and scanning electron microscope. Results indicate that the flank wear occurs dominantly by abrasive wear mode and the crater wear by adhesive wear mode. The results also indicate that the width of flank wear is closely related with the passive component of cutting force.

**Key words** : CBN cutting tool(입방정질화붕소 절삭공구), Wear mechanism(마모기구), Flank wear(프랭크 마모), Crater wear(크레이터 마모)

#### 1. 서 론

금속절삭과정이 제품생산에 중요한 위치를 차지하게 되면서 절삭공구는 고속도강으로부터 소결탄화물(sintered carbide), 피복소결탄화물(coated carbide), 세라믹, 써멧(cermet) 등으로 꾸준히 발전하였는데 계속 고경도화 되어가는 피삭재를 가공하기 위해서는 이러한 절삭공구로서는 한계가 있다. 고경도 재료의 절삭가공시는 절삭시간의 증가에 따른 공구의 파괴 및 마모가 매우 빠르고 불규칙적으로 일어나기 때문에 피삭재

의 표면조도 및 절삭성능의 저하, 공구교체 시간의 증가 등 생산성을 저하시키는 원인이 되었다. 이러한 필요에 의하여 고경도재료의 절삭가공시 내마모성이 뛰어난 인조다이아몬드 및 CBN이 개발되게 되었다.

CBN은 인조다이아몬드 제조공정과 유사하게 초고온-초고압에서 만들어진다. 인조다이아몬드는 철계재료의 가공시 피삭재내의 탄소와의 화학반응 및 산화현상 때문에 공구마모가 많이 일어나는 반면에 CBN은 이런 현상이 발생하지 않으므로 고경도의 철계재료 절삭가공에 매우 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 소결탄화물

\* 금오공과대학교 대학원

\*\* 금오공과대학교 기계설계공학과

보다 월등히 높은 경도(CBN:5000 Hv, 소결탄화물:2100 Hv)와 높은 열전도(CBN:3.3 cal/°C·cm·s, 소결탄화물: 0.08 cal/°C·cm·s)때문에 소결탄화물보다 열충격에 의한 공구파괴가 적게 일어난다.

CBN공구의 마모 메커니즘에 관한 연구는 그동안 일부 연구자들에 의하여 제한적으로 이루어져 왔다. Ohtani와 Yokogawa<sup>(1)</sup> 그리고 Ammi와 그의 연구진<sup>(2)</sup>은 CBN공구의 마모는 공작물내의 탄화물에 의한 연마작용(abrasion)에 의하여 일어난다고 말하였고, Enomoto와 그의 연구진<sup>(3)</sup>은 공구마모가 일어난 flank면의 금속성분분석을 통하여 CBN공구의 마모는 공작물재료의 응착(adhesion)에 의하여 발생한다고 주장하였다. 한편 Shintani와 그의 연구진<sup>(4)</sup>은 CBN공구를 이용한 절삭가공의 초기에 자주 발생하는 미소파괴(chipping)가 공구의 수명에 영향을 끼치는 주요원인이라고 설명하여 CBN공구의 마모 메커니즘에 대한 연구결과가 매우 다르게 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 상반되게 발표된 CBN공구의 마모메커니즘에 대해 체계적인 실험과 정밀한 분석을 통하여 새로운 규명을 시도하였다. 연구내용으로는 절삭초기의 공구마모, 공작물 경도별 공구마모, 장시간 절삭 가공시 발생하는 공구마모메커니즘, 그리고 공구마모와 절삭력과의 관계 등에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험을 위한 절삭은 5.5 kW Okuma 선반을 이용하여 수행하였다. 절삭작업시 주분력(Fc), 이송분력(Fa), 배분력(Fp)을 Kistler 9257B 모델의 압전형 공구동력계(Piezo-electric type tool dynamometer)를 사용하여 측정하였다. 이때 공구동력계로부터의 미세한 전압을 안정적으로 증폭하기 위하여 Kistler 5019A 모델의 다채널 증폭기(Multi channel charge amplifier)를 사용하였다. 그리고 데이터를 개인용 컴퓨터에서 해석하기 위하여 증폭된 아날로그 신호를 아날로그-디지털 변환기(Analog-Digital Converter)인 Metrabyte DAS-16G를 이용하여 디지털화 하였다. 개인용 컴퓨터로 전송된 신호들은 Kistler Cutting Force Software Turning Type 2821A를 이용하여 분석되었다. Fig. 1은 이러한 실험장치의 개략도를 나타낸다.

공구마모 메커니즘을 분석하고 마모량을 측정하기 위

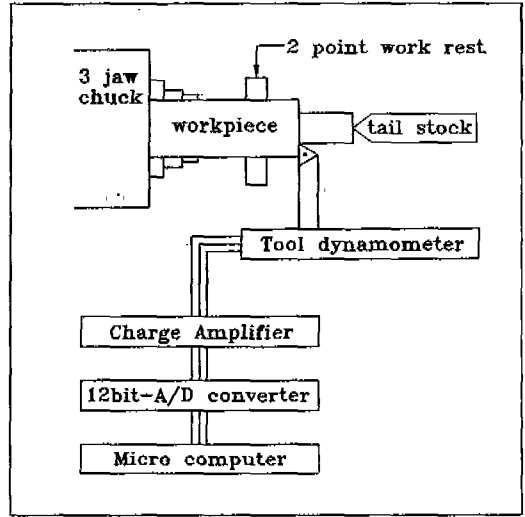


Fig. 1 Experimental set-up

하여는 1 μm 길이까지 측정이 가능한 공구현미경과 EDX를 갖추고 있는 전자주사현미경(Scanning Electron Microscope)을 사용하였다. 절삭가공시 사용된 공구는 미국 G사 CBN제품인 BZN6000과 BZN8100이었다. BZN6000은 CBN 함유량이 90 %로 매우 높으며 metal binder를 사용한 것으로 표면경화재료(45 Rc이상) 피삭재를 절삭하는데 연속 및 단속의 양가공 모드에서 중/고 절삭깊이까지 비교적 고속으로 적용할 수 있으며 BZN8100은 CBN 65 %와 세라믹으로 합성된 것으로 연삭가공을 생략하기 위한 표면경화재료의 고속 경절삭가공에 사용된다. 공구는 정삼각형 형상에 인선반경(nose radius)을 0.8 mm로 제작하였고 주절선각(major cutting edge angle) 90°, 부절선각(minor cutting edge angle) 30°, 후방경사각 -7°, 그리고 측방향 경사각 -7°로 설치하였다. 공작물은 직경 65 mm의 SCM 4종 환봉을 경도 21 Rc, 34 Rc, 47 Rc로 열처리하여 사용하였다.

위의 같은 실험장치와 공구를 이용하여 본 연구에서는 크게 두 단계로 실험을 하였다. 먼저 BZN6000과 BZN8100으로 위에 언급한 세가지 경도의 공작물을 90 초동안 절삭가공하면서 전자주사현미경으로 flank마모량을 측정하고 절삭저항력을 측정하여 두 공구의 절삭 성능을 비교하였다. 다음은 절삭성능이 우수한 것으로 판정된 BZN8100으로 절삭초기단계(360초 동안)의 공구마모가 어떻게 발생하는 살펴보고, 또한 장시간(2

시간 이상) 사용시의 공구마모에 대하여도 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

먼저 공작물의 경도에 따른 CBN공구의 절삭성능을 관찰하기 위한 절삭실험을 하였다. 절삭조건은 절삭속도  $v_c = 149 \text{ m/min}$ , 절삭깊이  $a_p = 0.3 \text{ mm}$ , 이송량  $f = 0.1 \text{ mm/rev}$ 으로 하였고 절삭유제를 사용하지 않는 건식절삭을 하였다.

Fig. 2는 BZN6000과 BZN8100으로 21 Rc, 34 Rc, 그리고 47 Rc의 경도를 가지는 공작물을 절삭하였을 때 절삭시간의 증가에 따른 공구의 flank면의 마모량을 나타낸다. BZN6000과 BZN8100 공히 절삭시간의 증가에 따라 flank면의 마모량이 대수적으로 증가(logarithmic increase)하였고 전 경도범위에서 BZN8100의 마모량이 BZN6000의 마모량보다 현저히 적었다. 특히할만한 것은 공작물의 경도와 공구마모와의 관계였다. Fig. 3은 절삭시간 90초 후의 공작물 경도별 flank마모량을 나타낸다. 일반적으로 피삭재의 경도가 증가함에 따라 공구마모도 증가할 것으로 생각되나 BZN6000으로 가공시 경도가 증가함에 따라 flank마모가 증가하다가 감소하는 것을 볼 수가 있었다. 반면에 BZN8100은 공구마모 차이가 크게는 나지 않았지

만 경도가 증가함에 따라 flank마모가 감소하다가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 4와 Fig. 5는 90초 절삭후의 두 공구의 절삭날 부분을 전자주사현미경으로 촬영한 것으로 두 공구 모드 crater마모는 거의 일어나지 않았으나 flank면의 마모가 연마마모(abrasive wear)의 형태로 균일하게 일어난 것을 보여주고 있다. BZN6000의 경우 21 Rc 공작물을 절삭한 flank면이 47 Rc공작물을 절삭한 flank면 보다 wear groove가 훨씬 거칠게 나타났다. BZN8100에서는 공작물의 경도에 따른 wear groove의 차이는 거의 나타나지 않았다.

Fig. 6은 위 시험에서의 절삭시간의 증가에 따른 절삭력의 변화를 나타낸다. 전체적으로 볼때 BZN6000의 절삭력이 BZN8100보다 주분력, 이송분력, 그리고 배분력 모두 크게 나타났다. BZN6000의 경우 Fig. 2에 보여진 바와 같이 절삭시간이 증가함에 따라 flank면의 마모가 비교적 크게 증가하였기 때문에 절삭저항력 역시 증가하는 경향을 보였다. 그러나 BZN8100의 경우는 절삭시간의 증가에 따른 flank면의 마모량의 증가가 매우 적었으므로 절삭저항력 역시 거의 변화하지 않음을 볼 수 있었다. 이것은 공구의 마모와 절삭저항력이 어떤 관계를 가지고 있음을 말해준다. 이 관계를 살펴 보기 위하여 Fig. 7에서는 본 실험에서 얻어진 모든 공

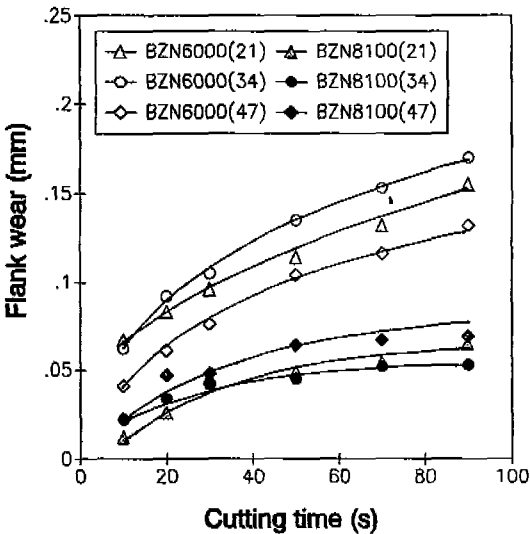


Fig. 2 Flank wear versus cutting time for 90 seconds of cutting for BZN6000 and BZN8100 tools

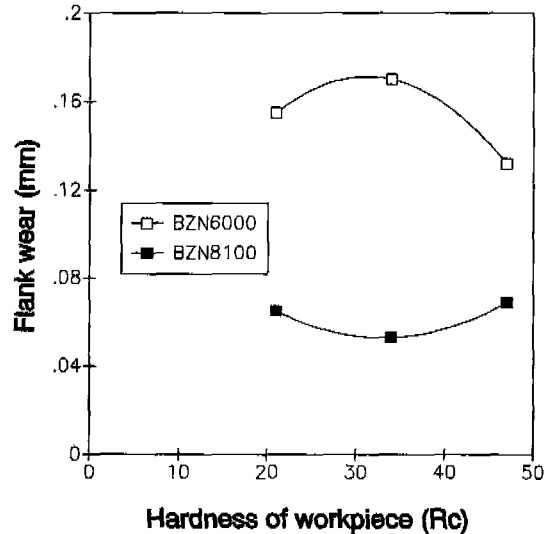


Fig. 3 Flank wear versus hardness of workpiece after 90 seconds of cutting for BZN6000 and BZN8100 tools

공구마모량과 절삭력 데이터를 한곳에 나타내 보았다. 공구마모량의 증가에 따라 주분력, 이송분력, 그리고 배분력 공히 선형적으로 증가하였으며 이때의 절삭저항력(N)과 flank 마모량(VB;mm)과는 각각  $F_c = 330VB + 105$ ,  $F_a = 168VB + 54$ , 그리고  $F_p = 211VB + 43$ 의 관계를 나타내었다. 따라서 주분력이 절삭초기의 공구마모에 가장 민감한 반응을 나타내는 것을 알 수 있었다.

위의 실험에서 BZN8100의 성능이 BZN6000보다 뛰어난 것을 확인하였으므로 다음은 BZN8100공구의 마모 메커니즘을 규명하기 위한 실험을 행하였다. 실험은 BZN8100으로 경도 47 Rc되는 SCM 4종을 절삭속도  $v_c = 205 \text{ m/min}$ , 절입량  $a_p = 0.5 \text{ mm}$ , 그리고 이송

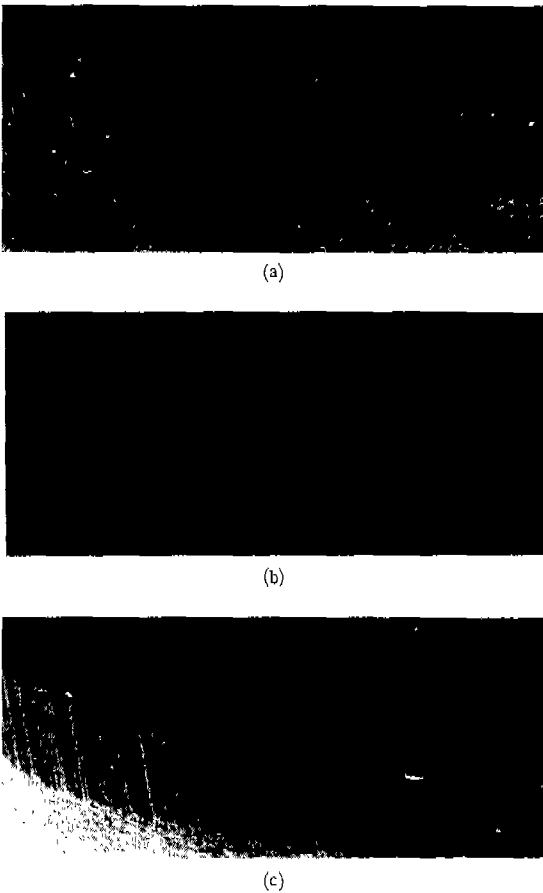


Fig. 4 SEM micrographs of BZN6000 tool after 90 seconds of cutting of (a) 21Rc, (b) 34Rc, (c) 47 Rc

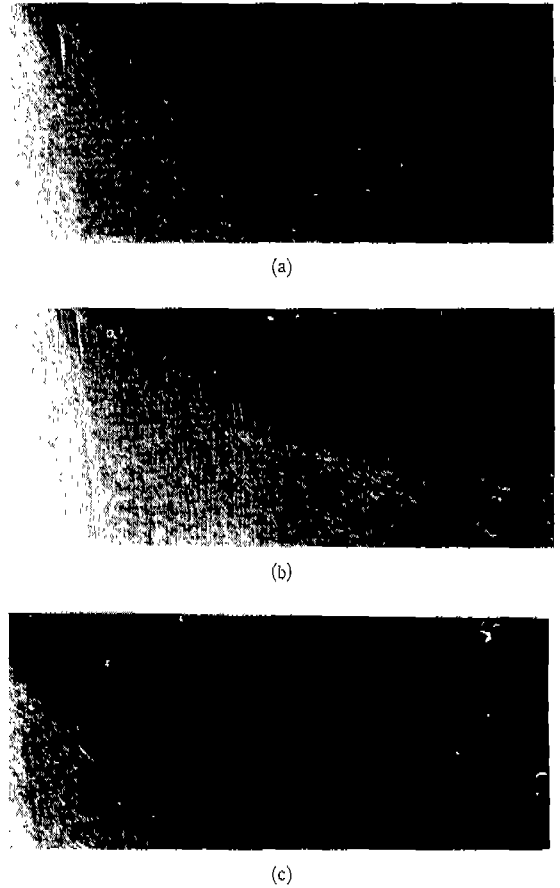


Fig. 5 SEM micrographs of BZN8100 tool after 90 seconds of cutting of (a) 21 Rc, (b) 34 Rc, (c) 47 Rc

$f = 0.1 \text{ mm/rev}$ 로 비교적 중절삭 조건으로 하여 2시간 18분동안 절삭실험을 하며 수시로 전자주사현미경으로 공구마모상태를 관찰하였다. Fig. 8은 이때의 공구형상을 고려한 공구와 공작물의 접촉상태를 나타낸다.

우선 절삭초기의 공구마모 메커니즘을 살펴보기 위하여 공작물을 360초 동안 절삭하면서 공구의 flank면과 tool face면을 전자주사현미경으로 시간대 별로 관찰하였는데 Fig. 9 (a)~(i)는 이때의 결과를 나타낸다. 먼저 flank면을 관찰한 결과를 살펴본다. (a)는 절삭실험을 하기 전의 공구형상을 200 배하여 전자주사현미경으로 촬영한 것인데 절삭작업하기 전의 공구의 flank면은 깨끗이 가공되어 있고 표면도 균일하여 특별한 결함이 없는 것을 보여준다. 절삭이 진행됨에 따라 flank의

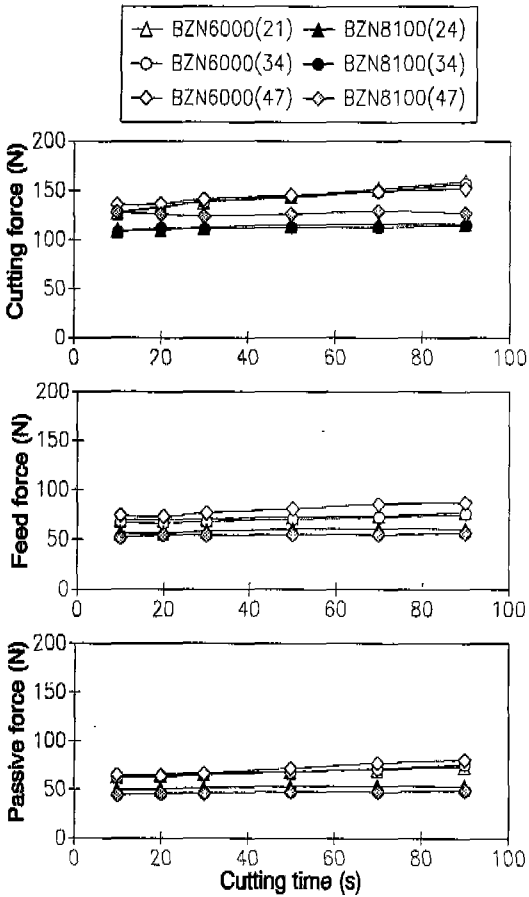


Fig. 6 Cutting forces versus cutting time for BZN 6000 and BZN8100 tools

마모량은 서서히 증가하여 절삭시간 30초 후에는 VB가 0.035 mm가 되었고 절삭시간 360초 경과후에는 VB가 0.095 mm가 되었다. 이때 flank마모가 어떻게 일어나는지를 알아보기 위하여 flank면을 고배율로 촬영하였다. (d)는 (c)에 보여진 30초 동안 절삭후의 공구 flank면을 800 배하여 촬영한 것이고, (f)는 같은 부분을 500배 하여 촬영한 것이다. 두 사진에 명확히 드러나 있는 것처럼 flank부분에는 공작물과의 상대운동으로 인한 높은 열에 의하여 공작물재료가 음착되어 있고 그 음착된 위로 groove형태의 마모가 발생한 것을 볼 수 있다. 따라서 flank면의 마모는 음착마모(adhesive wear)에 의하여 발생하는 것이 아니고 연마마모(abrasive wear)에 의하여 이루어진다는 것을 알 수 있다.

계속해서 이때의 crater 마모에 대하여 관찰한 결과를 살펴본다. Fig. 9의 (a)에 보여진 tool face의 챔퍼면은 flank면과 같이 특별한 결함이 없이 깨끗이 가공된 것을 보여준다. 10초 가공후에는 Fig. 9의 (b)에 보여진 것처럼 칩의 유출면(칩이 배출되는 챔퍼면)에서는 CBN입자들의 경계면에 많은 작은 크랙들이 나타났고 공작물의 외경과 접촉하는 칩의 유출면(Fig. 8의 A부분)에서는 약 20 μm 크기의 비교적 큰 chip notch가 발생하였다. 절삭시간이 30초 및 60초가 경과 되었을 때 Fig. 9의 (c), (f)와 같이 칩의 유출면에서는 CBN 입자들 경계면의 크랙의 크기가 더욱 증가하였으며,

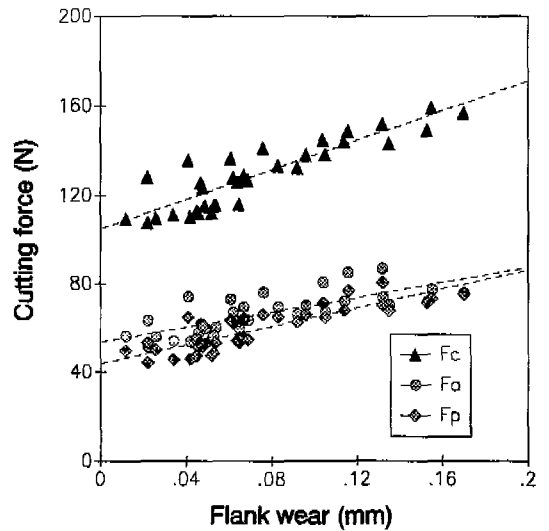


Fig. 7 Cutting forces( $F_c$ ,  $F_a$ ,  $F_p$ ) versus flank wear for BZN6000 and BZN8100 tools

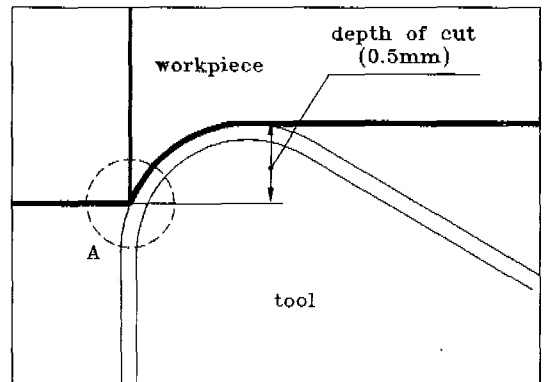
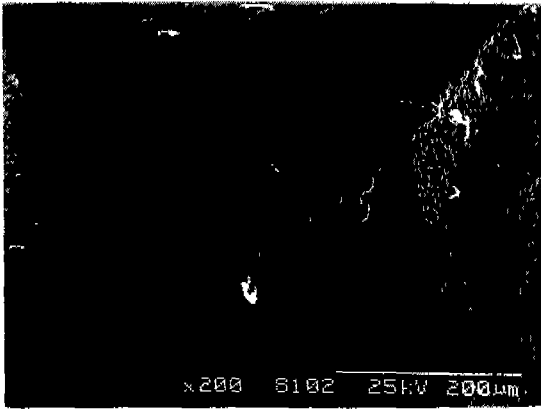


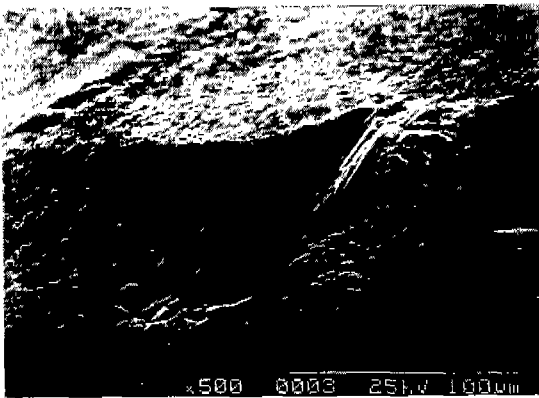
Fig. 8 Geometry of tool-workpiece contact zone



(a)



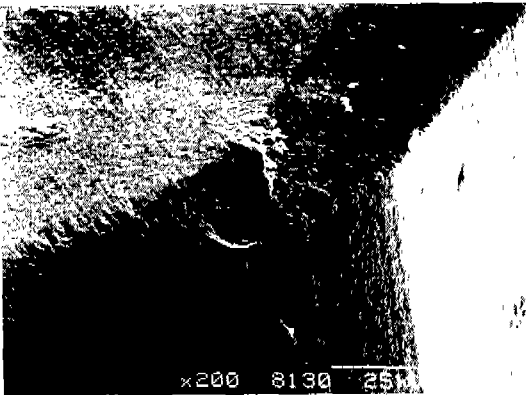
(d)



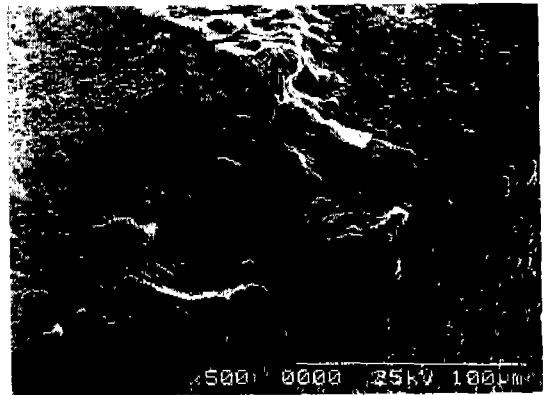
(b)



(e)



(c)



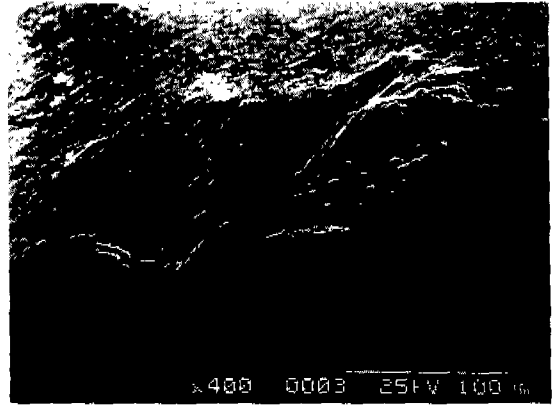
(f)

Fig. 9 SEM micrographs of BZN8100 tool, (a) before cutting, (b) after 10 seconds of cutting, (c) after 30 seconds of cutting

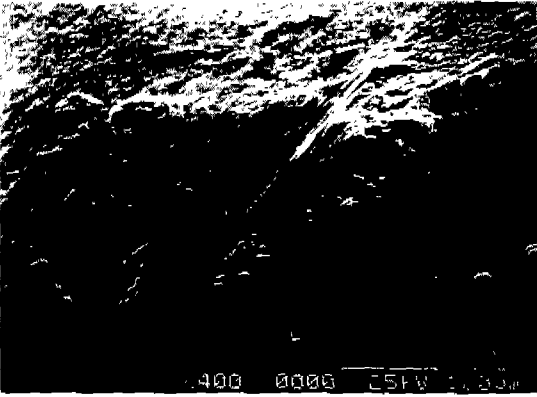
(d) enlarged view(800×) of the flank shown on (c), (e) enlarged view(5000×) of the flank shown on (c), (f) after 60 seconds of cutting



(g)



(j)



(h)



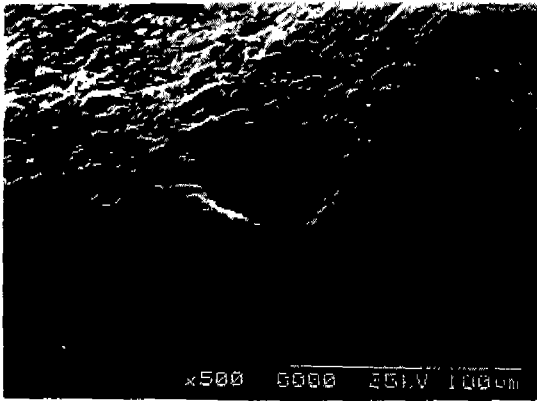
(i)

(g) after 120 seconds of cutting, (h) after 180 seconds of cutting, (i) after 240 seconds of cutting

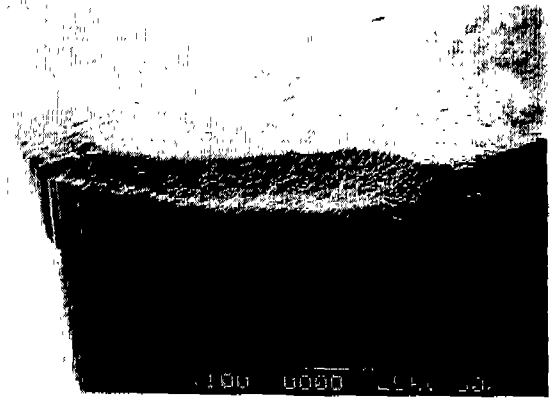
(j) after 360 seconds of cutting

chip notch의 크기는  $60 \mu\text{m}$ 로 증가하였다. 그리고 Fig. 9의 (g)와 같이 120초 경과후부터는 CBN입자들이 공구 표면으로부터 떨어져 나가기 시작하였고 chip notch의 크기는 더이상 증가하지 않았다. 계속해서 절삭시간이 180초, 240초 그리고 360초로 증가하면서 Fig. 9의 (h), (i), (j)에서처럼 칩의 유출면에서의 CBN입자들의 이탈현상이 조금씩 증가 되었고 chip notch의 깊이도 증가하였다.

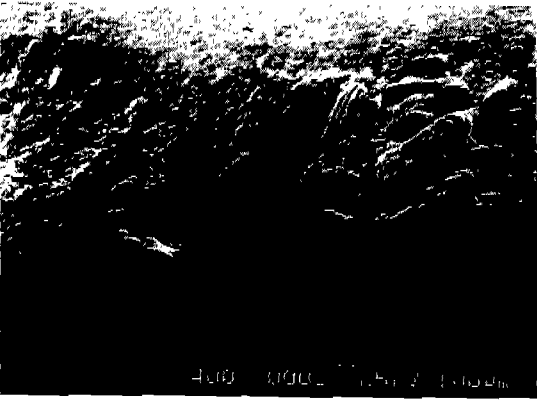
다음으로는 Fig. 10에 보여진 바와 같이 절삭시간 630초부터 2시간 18분까지 공구마모를 관찰한 결과를 살펴본다. 먼저 flank마모를 보면 flank마모는 절삭초기에 관찰했던 flank면에 공작물재료가 용착되고 그위에 groove형태의 연마마모가 일어나는 현상이 계속되어지는 것을 볼 수 있었는데 절삭시간이 증가함에 따라 Fig. 10(d), (e), (f)에 나타난 바와 같이 wear groove가 뚜렷히 깊게 나타났고 마모폭도 증가하였다. 절삭시간이 증가하면서 flank마모폭(VB)이 630초 후에는  $0.095 \text{ mm}$ , 32분 후에는  $0.122 \text{ mm}$ , 1시간 21분 후에는  $0.189 \text{ mm}$ , 그리고 최종적으로 2시간 18분 후에는  $0.25 \text{ mm}$ 로 대수적으로 (logarithmically) 비교적 일정하게 증가하였다. Fig. 11은 이때의 flank마모량과 절삭시간이  $VB = 0.01t^{0.54}$  ( $t$ :가공시간, sec)의 관계를 가지고 있음을 보여준다. 한편 Fig. 12는 이때의 flank마모량과 절삭력과의 관계를 보여준다. 절삭초기와는 달리 주분력과 이송분력은 flank마모량 증가에 따라 거의 같은 기울기로 아주 완만하게 증가하는 반면에 배분력은 비교적 큰 폭으로 선형적으로 증가하였다. 이



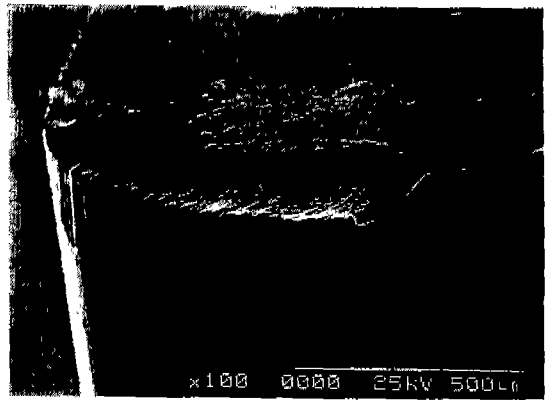
(a)



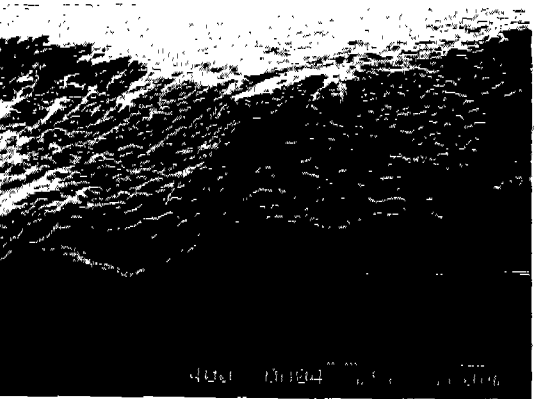
(d)



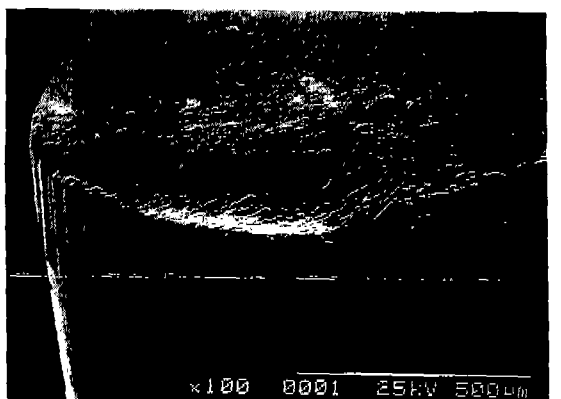
(b)



(e)



(c)



(f)

Fig. 10 SEM micrographs of BZN8100 tool, (a) after 630 seconds of cutting, (b) after 1250 seconds of cutting, (c) after 2060 seconds of cutting,

(d) after 2940 seconds of cutting, (e) after 4860 seconds of cutting, (f) after 8280 seconds of cutting



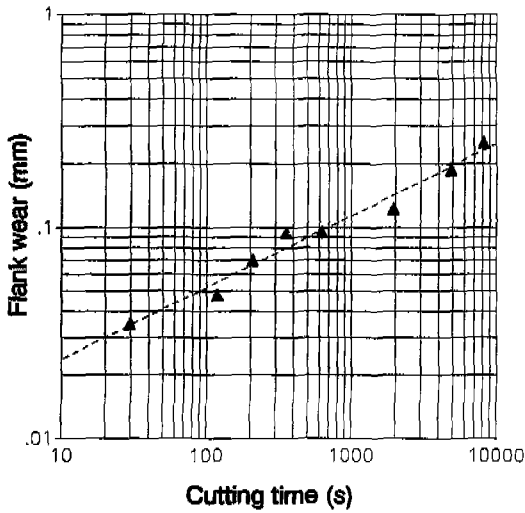


Fig. 11 Flank wear versus cutting time for BZN 8100 tool

때의 절삭력과 flank마모량과는  $F_c = 75VB+188$ ,  $F_a = 90VB+104$ , 그리고  $F_p = 345VB+120$ 의 관계를 나타내었다.

이어서 이때의 crater마모를 살펴보면 절삭시간이 630초가 지나면서 공작물과 접촉하는 칩퍼면 전체에서 CBN입자들이 떨어져 나가는 현상이 두드러지고 절삭시간 49분이 되었을 때는(Fig. 10(d)) crater마모의

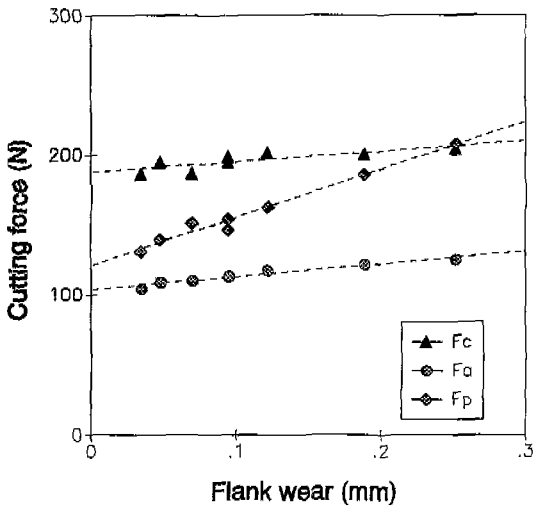
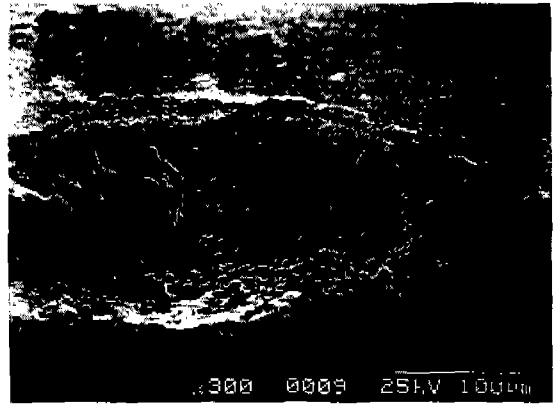
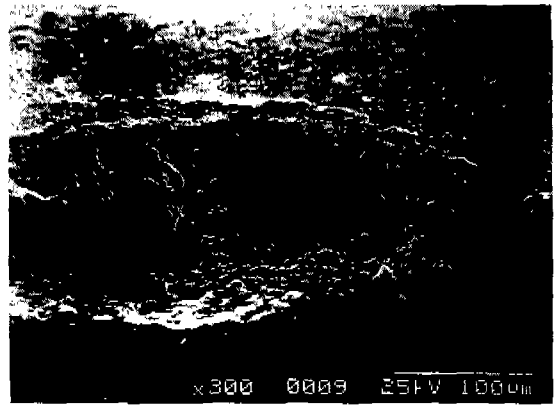


Fig. 12 Cutting forces versus Flank wear for BZN 8100 tool



(a)

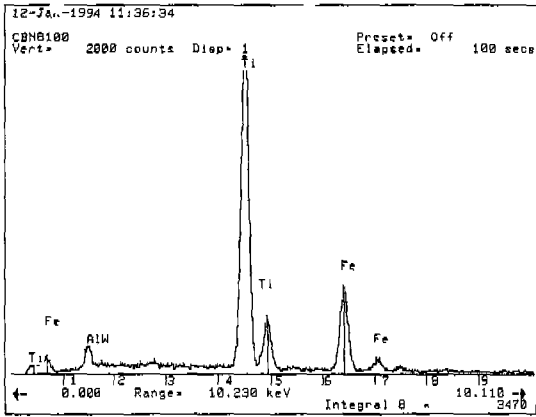


(b)



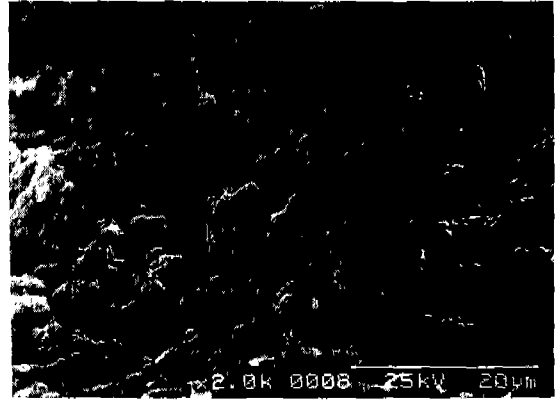
(c)

Fig. 13 (a) SEM micrographs of tool face of BZN8100 tool after 4860 seconds of cutting, (b) Fe-mapping, (c) Ti-mapping

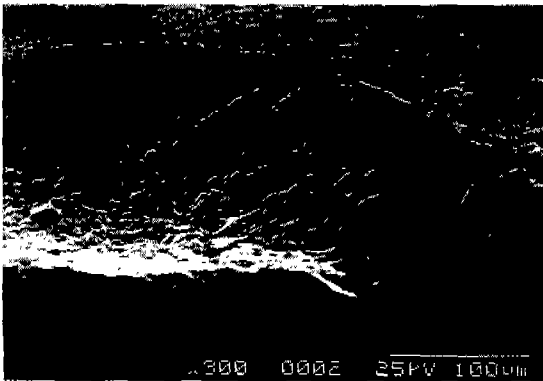


(d)

(d) EDX analysis of tool face



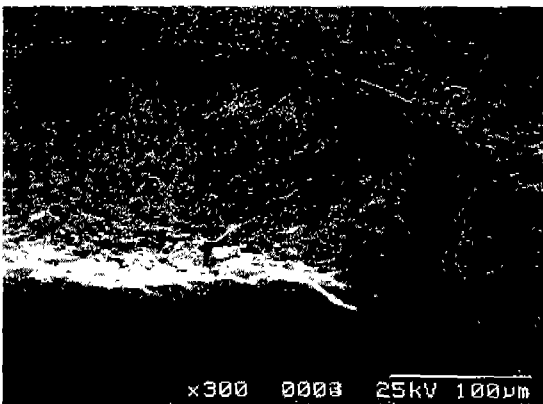
(a)



(a)



(b)



(b)



(c)

Fig. 14 (a) SEM micrographs of tool face of BZN8100 tool after 8280 seconds of tool, (b) Fe-mapping

Fig. 15 (a) Enlarged view(2000×) of tool face of BZN8100 tool after 4860 seconds of cutting, (b) Fe-mapping, (c) Ti-mapping

윤곽이 첩퍼면 위까지 뚜렷한 나타나기 시작하였다. 이때의 crater 깊이(KT)는 0.045 mm 이었고 crater의 최대폭(KBmax)은 0.18 mm였다. 절삭시간이 1시간 21분에서는 KT는 0.047 mm 그리고 KBmax는 0.26 mm로 crater의 폭과 깊이가 증가하여 crater의 윤곽이 육안으로 확인될 정도의 크기가 되었다.

이러한 crater 마모가 어떠한 마모기구에 의하여 이루어지는지를 규명하기 위하여 전자주사현미경을 이용하여 EDX 분석을 하고 X-ray mapping을 하였는데 Fig.13과 Fig.14는 각각 가공시간 1시간 21분 후와 2시간 18분 후의 분석결과를 나타낸다. Fig. 13. (a)와



(a)



(b)

Fig. 16 (a) Enlarged view(2000×) of tool face of BZN8100 tool after 8280 seconds of cutting, (b) Fe-mapping

Fig.14. (a)에 보면 crater 면에 큰 입자들이 보이는데 이것은 Fig. 13(b)와 Fig. 14(b)의 Fe-mapping에 나타난 바와 같이 칩이 crater면을 통과하면서 칩의 일부가 crater면에 응착된 것이다. Fig. 13(c)는 같은 부분의 Ti-mapping으로서 Fe가 없는 부분만 Ti이 나타나는 것을 보여준다. (여기서 Ti은 CBN입자에 코팅된 성분을 나타냄) 이러한 현상을 좀더 정확히 확인하기 위하여 이번에는 두 경우를 다시 2000배로 하여 X-ray mapping을 하였고 Fig. 15는 그 결과를 나타낸다. Fig. 15의 (a)는 1시간 21분 가공후의 공구표면중 Fig. 13의 (a)에서 미세한 입자로 보이던 부분을 2000 배로 촬영한 것이다. Fig. 15의 (b), (c)에 나타난 이 부분의 X-ray mapping결과를 보면 CBN입자 위의 여러 곳에 칩이 응착되어 있는 것을 보여준다. 또한 Fig. 16에 보여진 절삭시간 2시간 18분 후의 2000 배한 Fe-mapping 역시 같은 결과를 보여준다. 따라서 CBN 공구의 crater 마모는 절삭가공시 칩과 tool과의 상대운동으로 발생한 높은 열로 칩이 tool face에 응착(adhesion)되고 이 응착된 칩이 떨어져 나가면서 CBN입자들을 바인더로부터 떼어내는 형태의 응착마모(adhesive wear)가 지배적으로 일어나는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이상의 실험을 통하여 CBN공구로 열처리된 고경도 합금강을 가공할 때의 공구마모에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) flank면의 마모량은 절삭시간의 증가에 따라 대수적(logarithmically)으로 증가하며 flank 마모량의 증가는 절삭초기에는 절삭저항의 주분력을 가장 증가시키고 그 후에는 배분력을 가장 증가시킨다.

(2) flank 마모량과 절삭시간과는  $VB = 0.01 t^{0.34}$ 의 관계를 갖는다. (본 실험에 적용된 절삭조건에서)

(3) flank 마모는 칩이 flank면에 응착되고 그 위에 groove가 발생하는 것이 반복되는 형태의 연마마모(abrasive wear)에 의하여 일어난다.

(4) crater 마모는 절삭가공시 칩과 공구와의 상대운동으로 발생한 높은 열로 칩이 tool face에 응착되고 이 응착된 칩이 떨어져 나가면서 CBN입자들을 바인더로부터 떼어내는 형태의 응착마모(adhesive wear)에 의하여 일어난다.

## 후 기

본 연구는 동일문화장학재단의 연구비 지원으로 수행된 것으로 재단에 감사드립니다. 또한 실험을 위하여 협조하여 주신 GE Superabrasives, 오성 인터내셔널, 그리고 이화 다이아몬드 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Ohtani, T. and Yokogawa, H., "The Effects of workpiece Hardness on Tool Wear Characteristics", Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., Vol.22, No.3, pp.229-231, 1988.
2. Ammi, S. and Doi, M., "Wear Characteristics of Hard Tools in the Cutting of High-Carbon Steels", Japan Soc. of Mech. Eng., Vol.59, No.559, pp.909-914, 3, 1993.
3. Enomoto, S. and Miyazawa, S., "Characteristics of Tool Life of CBN Cutting Tool in Turning Chromium-Molybdenum Steels of various Hardnesses", Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., Vol.21, No.3, pp.209-210, 9, 1987.
4. Shintani, K., "Optimum Tool Geometry of CBN Tool for continuous Turning of Carburized Steel", Int. J. Mach. Tools Mfg., Vol.29, No.3, pp.403-413, 1989.