

알루미나 세라믹 가소결재의 피삭성

—다이아몬드 및 CBN공구의 절삭 성능—

(Machinability of Pre-sintered Alumina Ceramics)

김 성 청 (충북대 정밀기계공학과), 이 재 우*(두원공업전문대학 기계과)
S. C. Kim(Chungbuk National Univ.), J. W. Lee*(Doowon Tech. College)

ABSTRACT

In this study, unsintered and pre-sintered low purity alumina ceramics were machined with various tools to clarify the machinability, optimum tool materials and optimum cutting conditions. The main conclusions obtained were as follows. (1) In the case of dry cutting, the sintered diamond and natural diamond tools exhibit better performance in machining of the ceramics pre-sintered at lower temperature, and the tool lives of both tools in machining the ceramics pre-sintered at high temperature becomes extremely short. (2) The performance of CBN tool becomes better in dry machining of the ceramics pre-sintered at higher temperature. (3) When the pre-sintered ceramics were wet machined with sintered diamond, the tool life becomes considerably long, and higher cutting speed can be used than in the case of full-sintered ceramics. (4) In the case of the CBN and ceramic tools, the tool lives becomes shorter at wet cutting than at dry cutting, especially exhibiting extremely short tool life in wet cutting with ceramic tool.

Key Words : pre-sintered alumina ceramics, machinability, optimum tool material, tool life, optimum cutting condition

1. 서 론

세라믹스는 최근의 과학기술의 진보에 동반하여 우수한 성질을 가진 신소재로서 주목을 받고 있다. 특히, 기계공업 분야에 있어서도 고온기계부재나 정밀기계부재로서 사용하기 위한 활발한 연구 개발이 행해지고 있다.

그러나 세라믹스는 소결시의 수축 때문에 소결후의 형상·치수를 예측하여 성형치수를 결정하는 것이 극히 어려우므로, 최종공정으로써 기계가공이 필수 불가결하지만, 완전소결한 세라믹은 높은 경취성을 가지기 때문에 가공방법으로써 연삭과 같은 지립가공이 주체로 되어, 가공능률이 매우 낮고, 복잡한 형상 창성이 어렵다. 또한, 완전소결한 세라믹의 절삭가공에 관해서는 수편의 연구^{(1)~(2)} 보고가 행해져 왔으나, 공구수명이 짧고, 가공속도가 매우 늦어 일반의 부품가공에 적용하는 것이 곤란하다.

한편, 성형시의 밀도를 각부에 걸쳐 완전히 균일하게 하는것은 불가능하므로, 밀도 불균일의 성형체를 소결하면, 체적수축이 불균일 하게 일어나, 변형, 잔류응력, 균열 등의 결함이 발생한다. 세라믹의 우수한 성질에도 불구하고, 이러한 여러가지 이유 때문에 다양한 분야에서 활용 되는데는 많은 제약이 있어서, 세라믹의 가공문제 해결이 시급히 요구되어 왔다.

세라믹을, 소결후와의 밀도차가 적은 가소결 상태에서 절삭가공하면, 가공능률이 크게 향상되고, 복잡한 형상으로 가공 가능하며, 더우기 가소결재의 절삭가공 후에 완전소결을 행하면 소결시의 결함도 감소시킬 수 있다고 생각되어 진다. 전희의 연구⁽³⁾에서는 알루미나 세라믹의 절삭에서 세라믹 공구와 초경공구의 성능 및 공구형상의 영향에 관하여 보고 하였다.

금희의 연구에서는 여러 온도에서 가소결한 세라믹의 절삭가공을 행하여, CBN 공구 및 다이아몬드공구의 성능 및 습식절삭의 영향등을 검토했다.

2. 피삭재 및 실험방법

피삭재는 Al_2O_3 (약78%), SiO_2 (약16%), CaO, K_2O 를 주성분으로 하는 세라믹으로, 이것을 $\phi 35 \times 300$ mm로 압출성형하여 건조시킨 미소결재(white body) 및 여러 온도에서 가소결한 가소결재를 이용했다. 피삭재의 소결온도 및 기계적, 물리적성질을 Table 1에 보여준다. Table 1에 보여주는 수축률은 실험에 사용

Table 1 Characteristics of work materials

Sintering Temp. C	Bending Strength MPa	Density g/cm ³	Bulk density g/cm ³	Porosity %	Moisture rate %
500	11.86	3.01	1.86	38.14	20.44
600	13.52	3.01	1.82	38.58	21.24
800	13.72	3.06	1.83	40.16	21.92
1000	35.08	3.12	1.83	41.22	22.44
1050	37.83	3.10	1.85	40.07	21.73
1100	57.82	3.07	1.92	37.33	19.37
1150	100.06	2.97	2.15	27.79	12.91
1200	154.35	2.86	2.40	16.16	6.73
1250	-	-	-	-	-
1300	287.92	2.84	2.84	0.12	0.04

Table 2 Materials and geometries of tools used

Tool material	Tool geometry	Chamfer
CBN (Ceramic bonded)		0.15mm, -20°
Ceramic (TiC added)	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8	0.15mm, -20°
S.D.1 (Sintered diamond)		0.07mm, -20°
S.D.2 (Sintered diamond)	-5, -5, 15, 15, 15, 15, 0.8	
N.D. (Natural diamond)	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.2	

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed V	Varied from 3 to 120 m/min
Feed rate F	0.1 mm/rev., 0.25 mm/rev.
Depth of cut D	0.5 mm

한 피삭재를 완전소결하여, 그 때 일어난 축방향의 치수차로 부터 구한 것으로써, 가스결온도가 1000°C 이상에서 온도의 상승에 따라 수축율은 급격히 낮아지고 있다. 또한, 피삭재의 쇼아 경도는 가스결온도가 1000°C 이상에서, 온도의 상승에 따라 경도가 급격히 상승함을 보여준다. 미소결재는 건조시켜 수분을 제거한 상태의 것이며, 가스결재는 각기의 온도에서 1 hr 유지하였으며, 완전소결재는 1300°C에서 2 hr 유지한 것이다.

조직변화는 대략 다음과 같은 경향을 나타 내었다. 1000°C 이하의 가스결재에서는 가스결온도가 높은 가스결재일수록 입자의 접합·합체가 진행되고 있고, 1100°C 이상에서는 가스결온도가 높은 가스결재 일수록 결정의 성장이 현저하게 보여지며, 결정의 성장과 함께 공극의 체적이 감소하고, 1250°C 가스결재에서는 기공이 거의 폐기공으로 되어 있다.

Table 2는 사용한 공구의 공구재종 및 공구형상을 보여주며, Table 3은 실험조건을 보여준다. 절삭방식은 건식 및 습식으로 외경선삭을 행하였으며, 건식절삭의 경우는 공구 경사면상에 생성된 절삭칩을 진공청소기로 흡입하였다. 습식절삭의 경우는 수용성 절삭액(KS W2)을 1 : 50의 비율로 희석하고, 매분 7ℓ의 비율로 공구 경사면을 향하여 주입 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. CBN 공구 및 다이아몬드 공구에 의한 절삭

CBN공구, 천연다이아몬드공구(N.D.)를 사용하여 1000°C 가스결재 및 600°C 가스결재를 절삭 하였다. 그 결과를 Fig. 1의 공구수명선도에 보여준다. 비교를 위해 세라믹공구에 의한 결과도 동시에 나타낸다. 1000°C 가스결재를 절삭한 때는 세라믹공구의 수명이 가장 길게 된다. CBN공구는 세라믹 공구에 비해 공구수명이 짧게 되며, 천연다이아몬드공구의 수명이 가장 나쁘게 나타난다.

한편, 600°C 가스결재를 절삭한 때는 반대로 천연다이아몬드의 공구수명이 대단히 길게 되고, CBN 공

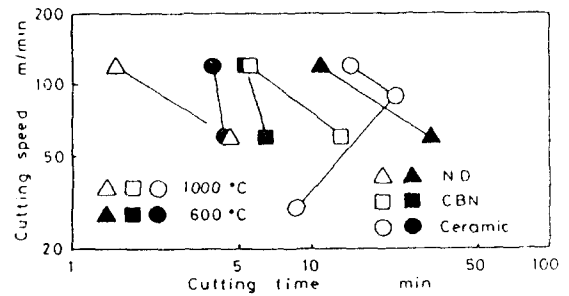
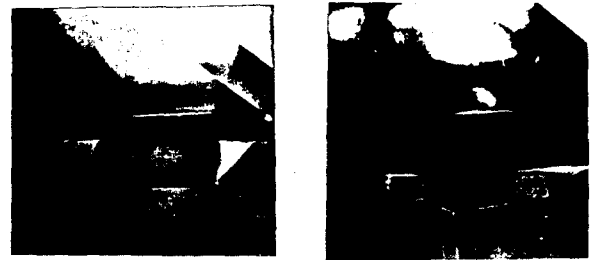


Fig. 1 Tool life curves of CBN, diamond and ceramic tools in machining of pre-sintered ceramics

D=0.5 mm, F=0.1 mm/rev., Criterion: V_{Bmax} =0.15 mm, Dry cutting



(a)Work: 600°C pre-sintered (b)Work: 1000°C pre-sintered
T=13 min T=2 min

Fig. 2 Typical wear patterns of natural diamond tool in machining of pre-sintered ceramics
V=120 m/min, F=0.1 mm/rev., D=0.5 mm

구, 세라믹공구의 순서로 공구수명이 짧아지게 된다. 또한, CBN 공구 및 세라믹공구로 절삭한 때는 가스결온도가 높은 피삭재의 피삭성이 좋게 되지만, 천연다이아몬드공구로 절삭 한 때는 반대로 가스결온도가 낮은 피삭재의 경우가 피삭성이 좋게 되고, 절삭속도의 영향도 크다. Fig. 1 에는 보여주지 않지만, 소결다이아몬드공구(S.D.1)로 절삭한 때도 천연다이아몬드공구와 동일한 수명 특성을 나타 내었다. Fig. 2에는 천연다이아몬드공구의 마모형태의 일례를 보여준다. 600°C 가스결재 및 1000°C 가스결재의 두 경우 모두 공구여유면이 균일하게 마모되어 있고, 절인의 손상이 적다.

Fig.3에 세라믹공구 및 다이아몬드공구로 절삭 한 때의 가공면을 보여 준다. 세라믹공구의 가공면이 Fig. 3(a)와 같이凹凸이 있는 면으로 되어 있는데 비해, 다이아몬드공구로 절삭한 경우는 Fig. 3(b)와 같이 광택이 있는 평탄한 면으로 되어 있다. 또한, 세라믹공구 및 소결다이아몬드공구를 사용하여 동일 조건에서 절삭 한 때의 절삭칩의 SEM 사진을 Fig. 4에 보여준다. 세라믹 공구로 절삭한 때는 Fig. 4(a)에서 보여주는 바와 같이 큰 피삭의 칩으로 되는데 비해, 다이아몬드공구로 절삭 한 때는 Fig. 4(b)와 같이 미세 분말형의 칩이 대부분을 차지한다.

이와 같이 다이아몬드공구의 마모가, 가스결온도가 높은 피삭재를 고속으로 절삭하는 경우에 크게 되는

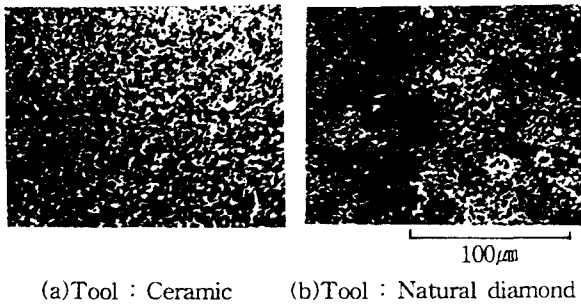


Fig. 3 Comparison of the finished surface in machining the presintered ceramics with ceramic tool and diamond tool
 $V=120$ m/min, $F=0.1$ mm/rev., $D=0.5$ mm

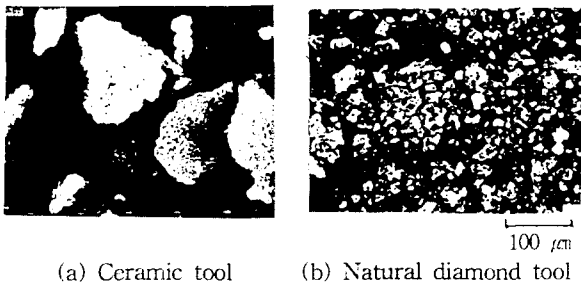


Fig. 4 Shapes of chips in machining of the pre-sintered ceramics with ceramic tool and diamond tool
 $V=120$ m/min, $F=0.1$ mm/rev., $D=0.5$ mm

주 원인은, 절삭온도가 순간적, 국부적으로 상당히 높게 되어, 다이아몬드의 탄화에 의해 내마모성이 저하된 것과 다이아몬드공구로 절삭한 가공면은 광택이 있는 평탄한 면이 대부분이라는 것으로 부터, 공구 절인과 피삭재와의 접촉이 많게 된다는 것이 생각 되어진다.

그외의 원인으로서는, 다이아몬드공구로 절삭한 때의 절삭칩이, 가소결온도가 높은 피삭재에서도 미세 분말형이 대부분으로 되고, 이러한 미세 분말형의 절삭칩은 공구에 부착하며, Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 피삭재의 가공면에도 부착하는데, 공구에 부착한 절삭칩은 공구여유면에 침입될 가능성이 있고, 이것에 의해 다이아몬드공구의 수명에 영향을 미치는 것으로 생각 된다.

Fig. 6에 CBN공구의 마모형태를 보여준다. 1000℃ 가소결재 및 600℃ 가소결재를 절삭한 때는 각각 Fig. 6(a), (c)에서 보여주는 바와 같이 공구여유면이 거의 균일하게 마모되어 있다. Fig. 6(b), (d)는 1000℃ 및 600℃ 가소결재를 절삭한 때의 공구의 마모면을 확대한 SEM사진을 보여주는데, 1000℃ 가소결재의 경우는 부착물이 소량 관찰되는凹凸면으로 되어 있는데 비해, 600℃ 가소결재의 경우는 활과 흔적이 보이는 면으로 되어 있다.

이와같이 CBN 공구로 절삭하는 때는, 세라믹공구와 마찬가지로 가소결온도가 높은 피삭재의 경우가 대규모파괴에 의한 재료제거가 중심이 되고, 공구여유면에서의 접촉도 적으며, 공구여유면으로의 절삭칩의



Fig. 5 Finished surface covered with chips in machining of pre-sintered ceramics with natural diamond tool
 Work : 600℃ pre-sintered, $V=60$ m/min, $F=0.1$ mm/rev., $D=0.5$ mm

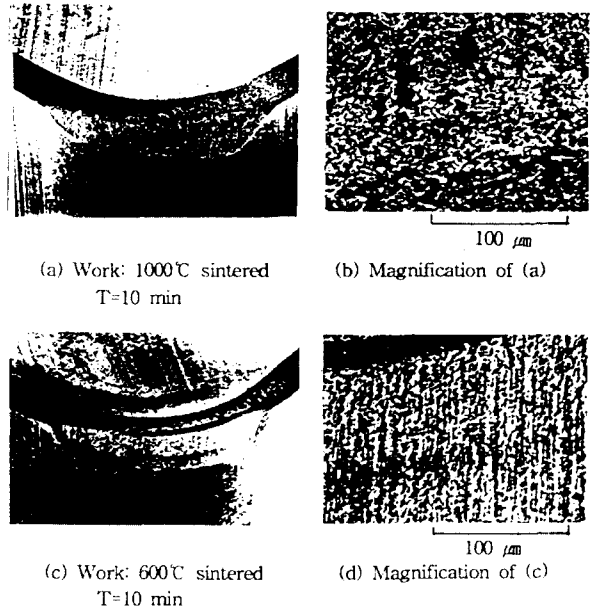


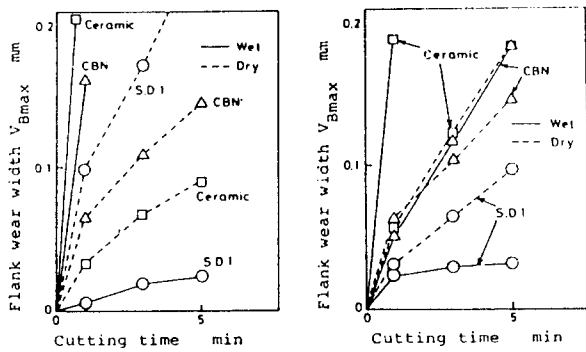
Fig. 6 Typical wear patterns of CBN tool in machining of pre-sintered ceramics
 $V=120$ m/min, $F=0.1$ mm/rev., $D=0.5$ mm, Dry cutting

침입도 적게 되기 때문에 피삭성이 좋게 된다. 그러나 CBN 공구는 공구마모를 억제하는 부착물이 공구 마모면에 생성⁽³⁾되지 않기 때문에 세라믹 공구보다 공구 수명이 짧아지게 된다고 사료 된다.

3-2 습식 절삭의 영향

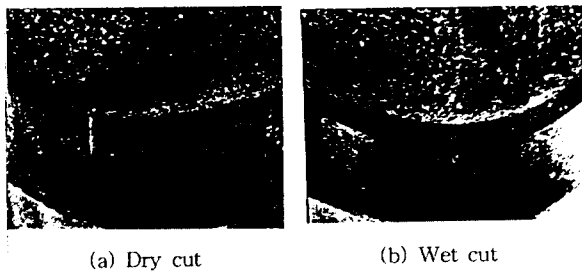
수용성 절삭액을 사용하여 습식절삭을 행하고, 그 영향에 대하여 조사 하였다. 이 결과를 Fig. 7의 공구 마모진행선도에 보여준다. 1000℃ 가소결재 및 600℃ 가소결재의 양자의 경우에 소결다이아몬드공구(S.D.2)로 습식 절삭하면 마모의 진행이 건식에 비해 대단히 느려지게 되고, 가소결온도에 의한 차는 그다지 없다. 이것에 비하여, CBN공구, 세라믹공구로 절삭한 때는 반대로 습식 절삭한 경우가 마모진행이 빨라 지게 된다.

Fig. 8에 습식 및 건식 절삭한 때의 소결다이아몬드공구의 마모형태의 일례를 보여준다. 습식 절삭하면, Fig. 8(b)와 같이 마모가 대단히 적어짐을 알 수 있다. 이것에 의해서도 다이아몬드공구를 사용하여 가



(a) Work: 1000°C sintered (b) Work: 600°C sintered

Fig. 7 Effect of cutting fluid on the tool wear in machining of pre-sintered ceramics with various tools
 $V=120$ m/min, $F=0.1$ mm/rev., $D=0.5$ mm



(a) Dry cut (b) Wet cut

Fig. 8 Effect of cutting fluid on the tool wear in machining of pre-sintered ceramics with sintered diamond tool(S.D.1)
 Work: 1000°C, $T=5$ min, $V=120$ m/min, $F=0.1$ mm/rev., $D=0.5$ mm

소결온도가 높은 피삭재를 절삭하는 때는 절삭온도가 다이아몬드공구의 수명에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에 습식 절삭한 때의 CBN공구 및 세라믹공구의 마모형태의 일례를 보여준다. CBN공구는 Fig. 9(a)와 같이 공구여유면의 경계마모가 크게 나타나 있고, 마모면에는 Fig. 9(b)와 같이 찰과흔적이 보여진다. 이러한 현상은 전술한 건식절삭에서도 가소결온도가 낮은 피삭재를 절삭한 때에 관찰되었다. 세라믹공구는 건식절삭시에 관찰된⁽³⁾ 공구마모면에서 부착물이 전혀 생성되지 않고, 경계부분의 마모가 크게 되어 있다. 특히 가소결온도가 높은 피삭재를 절삭한 경우는 Fig. 9(d), (e)에서 보여주는 바와 같이 큰 흠상의 마모형태를 보여준다.

Fig. 10은 건식절삭과 습식절삭한 경우의 절삭칩의 배출상태를 보여준다. 건식절삭한 경우는 Fig. 10(a)와 같이 공구경사면으로부터 절삭칩이 힘있게 배출된다. 이것에 반하여, 습식절삭한 때는 Fig. 10(b)에서 보여주는 바와 같이 점토상으로 되어 공구경사면으로부터 밀려 나오는 상태로 된다.

Fig. 11은 이 때 배출된 절삭칩의 SEM 사진으로써, Fig. 11(a)가 건식절삭의 절삭칩, Fig. 11(b)가 습식절삭의 절삭칩을 보여준다. 습식절삭의 경우는 건식



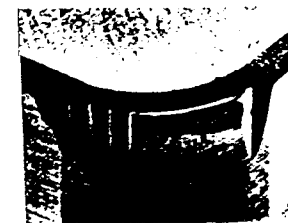
(a) Tool: CBN
 Work: 1000°C, $T=1$ min

(b) Magnification of (a)



(b) Tool: ceramic
 Work: 600°C, $T=1$ min

(d) Tool: ceramic
 Work: 1000°C, $T=1$ min



(e) Tool: ceramic
 Work: 1100°C, $T=0.5$ min

Fig. 9 Effect of cutting fluid on the tool wear in machining ceramics with CBN tool and ceramic tool

$V=120$ m/min, $F=0.1$ mm/rev., $D=0.5$ mm



(a) Dry cut

(b) Wet cut

Fig. 10 discharge type of chips in machining the pre-sintered ceramics

절삭에 비해 절삭칩의 크기가 상당히 작음을 알 수 있다.

이 영향은 절삭가공표면 및 절삭저항에도 나타나 있다. Fig. 12(a), (b)에 건식절삭과 습식절삭한 때의 가공면을 보여 준다. 건식절삭한 때의 가공면은凹凸이 많은 면을 보여주고 있으나, 습식절삭에서는 평탄한 부분이 많은 가공표면을 보여준다.

Fig. 13은 동일 조건에서 건식절삭한 경우와 습식

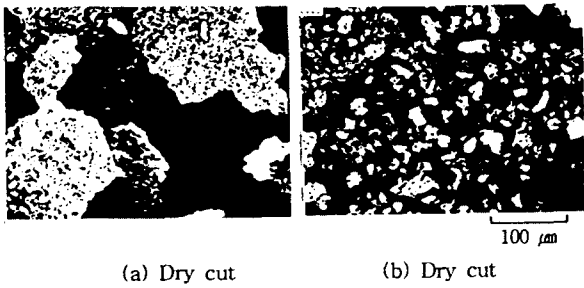


Fig. 11 Shapes of chips generated in dry and wet cutting
Work: 1050°C pre-sintered, Tool: ceramic tool
V=120 m/min, F=0.1 mm/rev., D=0.5 mm

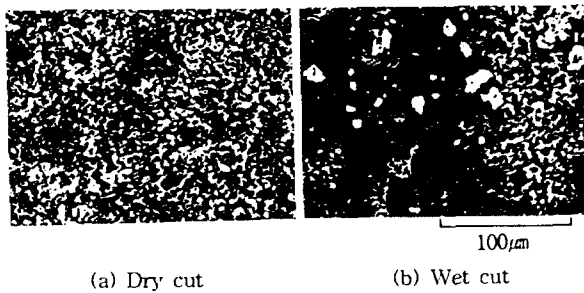


Fig. 12 Finished surfaces in the dry and wet cutting of pre-sintered ceramics
Work: 1050°C pre-sintered, Tool: Ceramic tool,
V=120 m/min, F=0.1 mm/rev., D=0.5 mm

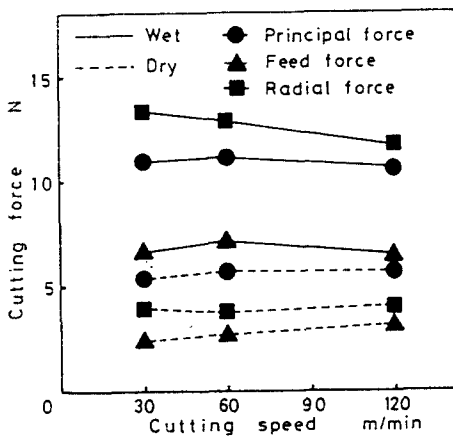


Fig. 13 Comparison of cutting force in dry and wet cutting
Work: 1050°C pre-sintered, Tool: Ceramic tool,
V=120 m/min, F=0.1 mm/rev., D=0.5 mm

절삭한 경우의 절삭저항을 보여준다. 습식절삭한 경우는 건식절삭에 비해 절삭저항의 3분력 전부가 크게 되고, 특히 배분력이 약 5배에 달한다. 이와 같은 현상을 볼 때, CBN공구 및 세라믹공구를 사용하여, 특히 가스결온도가 높은 피삭재를 가공하는 경우에는 Fig. 14와 같은 절삭상태로 된다고 생각 되어진다. 즉, 건식절삭에서는 Fig. 14(a)와 같이 절삭시의 파괴가 크고, 절삭칩의 배출성도 좋기 때문에 공구여유면

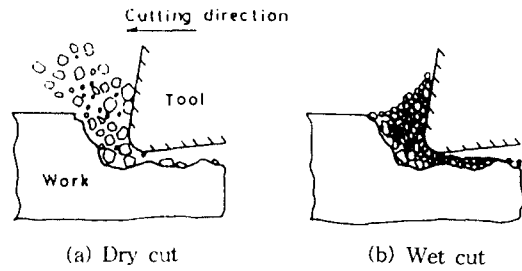


Fig. 14 Schematic models of the chip formation process in wet and dry cutting of pre-sintered ceramics

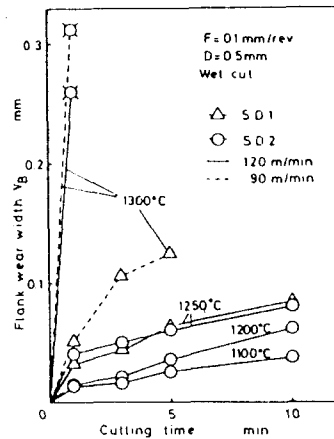


Fig. 15 Wear progress curves in machining of ceramics with sintered diamond tools

과 피삭재와의 접촉이 적은 상태로 된다. 그러나, 습식절삭의 경우는 절삭칩의 배출성이 나쁘게 되기 때문에 Fig. 14(b)와 같이 공구인선으로 부터 공구여유면으로 칩입되는 절삭칩이 증가하여, 공구여유면 마모가 현저히 크게 된다. 더우기 세라믹공구에서는 공구마모를 억제하는 공구에서의 부착물이 습식절삭에서는 생성되지 않은것도 공구 마모를 현저히 크게한 원인의 하나로 생각 된다.

한편, 소결다이아몬드공구를 사용하여, 고온의 가스결재 및 완전소결재의 습식절삭을 행한 결과를 Fig. 15의 공구마모진행선도에 보여준다. 가스결재를 절삭한 때는 가스결온도가 높은 것일 수록 초기마모가 크게 되지만, 마모량은 전체적으로 적다. 한편, 완전소결재를 절삭한 경우의 소결다이아몬드 S.D.2는 단시간에 파손을 일으키고, 소결다이아몬드 S.D.1도 가스결재에 비해 현저히 마모진행이 빨라지고 있다.

Fig. 16에 소결다이아몬드공구의 마모형태의 일례를 보여준다. 가스결재를 절삭한 때는 소결다이아몬드 S.D.1 및 S.D.2는 각각 Fig. 16(a), (b)에 보여주는 바와 같이 마모량은 동일 정도로서 작게 되어 있다. 한편 완전소결재를 절삭한 경우, 소결다이아몬드 S.D.1은 Fig. 16(c)에 보여주는 바와 같이 단시간에 마모가 크게 되고, 소결다이아몬드 S.D.2공구도 Fig. 16(d)와 같이 파손이 발생 하였다. Fig. 16(e)는 S.D.2공구의

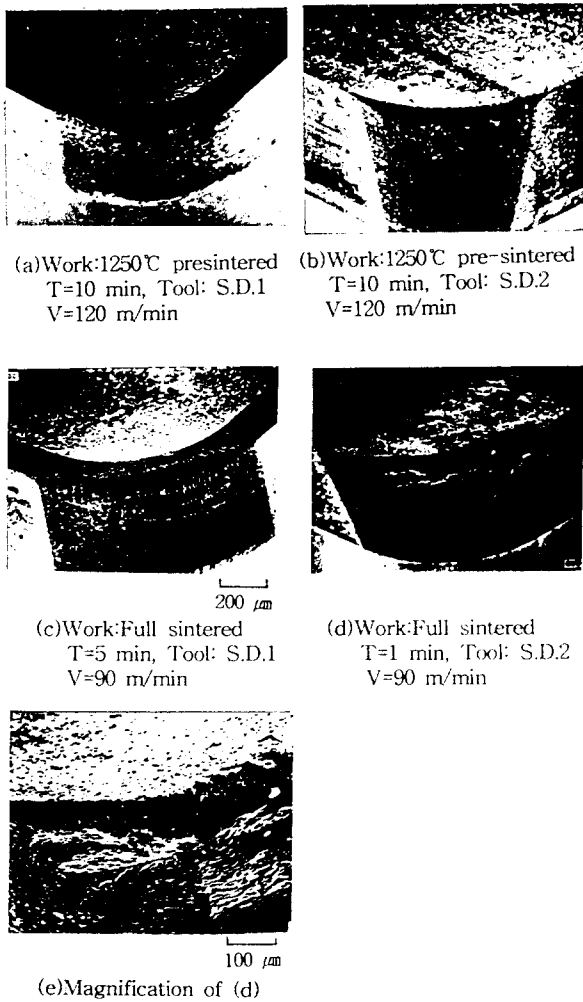


Fig. 16 Typical wear patterns of sintered diamond tools in machining ceramics
F=0.1 mm/rev., D=0.5 mm, Wet cutting

마모면을 확대한 SEM 사진을 보여 준다. S.D.2공구에 있어서도 대규모 칩핑이 발생한 상부에 상당한 어브레시브 마모가 관찰 된다.

이와 같이 소결다이아몬드공구로서 가소결재를 습식절삭 하는 때에는 고온에서 가소결한 피삭재의 경우도 완전소결재 보다 상당한 고속에서 절삭 가능하다.

4. 결 론

저순도 알루미늄이나 세라믹의 미소결재, 가소결재, 및 완전소결재의 절삭실험을 행한 결과, 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

(1) 건식절삭의 경우, 소결다이아몬드 및 천연다이아몬드공구는 가소결온도가 높은 경우보다, 가소결온도가 낮은 피삭재에서 더 우수한 성능을 보여주며, 가소결온도가 높은 피삭재의 절삭시는 공구수명이 극히 짧아지게 된다.

- (2) 건식절삭의 경우, CBN공구는 가소결온도가 높은 피삭재에서 공구수명이 더욱 길게 된다.
- (3) 소결다이아몬드공구 및 천연다이아몬드공구는 건식절삭에 비해 습식절삭의 경우가 공구수명이 현저히 길어지며, 습식절삭시는 고온에서 가소결한 피삭재에서도 공구수명이 극히 길어지게 된다.
- (4) CBN 공구 및 세라믹공구는 건식절삭에 비해 습식절삭의 경우가 공구수명이 짧아지며, 특히 세라믹공구에 의한 습식절삭에서 공구수명이 극히 짧아지게 된다.

참 고 문 헌

- (1) 飯島 昇, 竹山秀彦, 柏瀬雅一, 1985, "燒結ダイヤモンド工具の切削性能と摩耗解析(第1報)- 燒結ダイヤモンド工具の力學的損傷機構," 精密機械, Vol. 50, No. 7, pp. 1100~1107.
- (2) 飯島 昇, 竹山秀彦, 柏瀬雅一, 1985, "燒結ダイヤモンド工具の切削性能と摩耗解析(第2報)- 燒結ダイヤモンド工具の熱化學的損傷機構," 精密機械, Vol. 50, No. 9, pp. 7469~7476.
- (3) 김성청, 이재우, 1996, "Al₂O₃ 세라믹 가소결재의 피삭성," 대한기계학회 1996년 춘계학술대회 논문집, pp. 588~593.