

<기술논문>

## 알루미나 세라믹 예비소결체의 피절삭성

김성청\* · 이재우\*\*

(1996년 10월 28일 접수)

### Machinability of Presintered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics

Sung-Chung Kim and Jae-Woo Lee

**Key Words :** Presintered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics(알루미나 세라믹 예비소결체), Machinability(피절삭성), Tool Life(공구수명), Surface Roughness(표면거칠기)

#### Abstract

When the presintered ceramics are machined with ceramic tool, the tool life becomes extremely short. The CBN tool exhibits the best performance in dry machining of the ceramics presintered at 1450°C among all cutting tests. The roughness of the machined surface of the ceramics presintered below 1350°C is smaller than that of the ceramics presintered at 1450°C. While the performance of the cemented carbide and CBN tools is better in dry than in wet machining, the diamond tool shows adverse tendency. The tool life is not affected by the feed rate and depth of cut. During the following full-sintering after the machining of the presintered ceramics, the surface roughness decreases up to 62%. The finished surface in machining the presintered ceramics is much better than that in machining the full-sintered ceramic.

#### 1. 서 론

세라믹스는 최근의 과학기술의 진보에 동반하여 우수한 성질을 가진 신소재로서 주목을 받고 있다. 특히, 기계공업에 있어서도 용도개발이 활발히 이루어지고 있고, 다중 소량생산에서 복잡한 형상을 가진 부품에도 적용하려는 요구가 높아지고 있다.

그러나 세라믹스는 소결시의 수축때문에 소결후의 형상·치수를 예측하여 성형치수를 결정하는 것이 극히 어려우므로, 최종 공정으로서 기계가공이 필수 불가결하지만, 완전소결한 세라믹은 높은 경도와 취성을 가지기 때문에 가공방법으로써 연삭과 같은 입자가공이 주체로 되어, 가공능률이 매우 낮고, 복잡한 형상가공이 어려우며, 연삭시는 표면손

상의 발생에 의해 강도저하를 일으키게 된다.<sup>(1~3)</sup> 소결이 전혀 행해지지 않은 성형체(green body)의 경우에는 절삭가공이 행해지고 있지만,<sup>(4)</sup>가공속도, 가공능률, 부품의 칩킹 및 치수정밀도 등에 문제가 많다. 한편, 완전소결한 세라믹의 절삭가공에 관해서는 수편의 연구보고<sup>(5,6)</sup>가 행해져 왔으나, 공구수명이 짧고, 가공속도가 매우 늦어 일반의 부품가공에 적용하는 것이 곤란하다. 이러한 여러 가지 난점 때문에 다양한 분야에서 활용하는데는 많은 제약이 있어서, 세라믹의 가공문제 해결이 시급히 요구되어 왔다.

세라믹을, 소결후와의 밀도차가 적은 예비소결 상태에서 절삭가공하면 가공능률이 크게 향상되고 복잡한 형상으로 가공 가능하며, 더욱이 성형체 각부의 밀도차를 작게 할 수 있어, 예비소결체의 절삭가공 후에 완전소결을 행하면 소결시의 균열생성 등의 결함도 감소시킬 수 있다고 생각된다. 또한

\*회원, 충북대학교 정밀기계공학과

\*\*회원, 두원공업전문대학 기계과

예비소결체의 절삭면의 거칠기는, 완전소결시의 수축현상때문에 작아진다. 따라서 예비소결체 절삭면의 거칠기가 충분히 작다면, 완전소결후의 연삭가공공정을 생략할 수 있다. 그 결과, 연삭에 의한 미세균열의 발생이 없어지게 되어 강도 및 내마멸성을 크게 할 수 있다. 예비소결체의 절삭가공 후에 완전소결을 행하고, 최종 가공으로서 연삭을 실시하는 경우에도 가공여유를 최소화할 수 있어, 생산성 및 생산비 절감에 큰 효과가 있다.

본 논문에서는 여러 온도에서 예비소결한 고순도 알루미나 세라믹의 절삭가공을 행하여, 피절삭성, 최적공구 및 최적절삭조건 등을 검토하였다.

## 2. 피절삭재 및 실험방법

피절삭재는  $Al_2O_3$ 가 99%이며, CaO 및  $SiO_2$ 가 소량 존재하는 고순도 알루미나 세라믹으로, 이것을  $\phi 50 \times 300$  mm로 금형에서 압출성형하여 건조시킨 성형체(green body), 이것을 여러 온도에서 예비소결한 예비소결체 및 완전소결체이다. 예비소결체는 Table 1의 각 예비소결온도에서 질소 분위기 중에 1시간 유지하고, 완전소결체는 1600°C의 질소

분위기중에서 2시간 동안 상압 소결한 것이다. 각 피절삭재의 예비소결 온도에 따른 조직변화는 대략 다음과 같은 경향을 보였다. 1200°C 이하에서 예비소결한 소결체는 예비소결온도가 높을수록 입자의 접합·합체가 진행되고, 1400°C 이상에서 예비소결한 소결체는 예비소결온도가 높을수록 결정의 성장이 현저하게 보이며, 결정의 성장과 함께 공극의 체적이 감소하고, 1500°C에서 예비소결한 소결체는 폐기공이 현저히 많아진다. Table 1은 각종 온도에서 예비소결한 소결체의 물리적 및 기계적 성질을 보여준다. 수축률의 측정은 실험에 사용한 피절삭재물 일정한 형상으로 가공한 후에 그것을 완전소결하여, 그 때 생긴 축방향의 치수차로부터 구한 것으로서, 축방향과 반경방향에서의 수축률의 차는 그다지 나타나지 않았다. 예비소결체의 경도 및 굽힘강도는 예비소결온도가 1000°C 까지는 그다지 변화가 없지만, 1300°C 이상이 되면 예비소결 온도의 증가에 따라 급격한 상승을 보여주고, 수축률도 마찬가지로 1000°C 이상에서 급격히 작아진다.

Table 2는 실험에 사용된 공구의 재종 및 형상을 보여주며, 절삭속도, 이송속도 및 절삭깊이의 영향을 조사하기 위하여 Table 3과 같이 절삭조건

Table 1 Characteristics of machined materials

Presintering temperature °C	Vickers hardness GPa	Bending strength MPa	Shrinkage rate %	Density g/cm <sup>3</sup>	Porosity %	Moisture rate %
Green body (unsintered)	0.2	9.82	14.2	2.99	-	5.28
900	0.3	11.86	12.6	2.80	32.14	1.14
1000	0.9	15.12	12.2	2.89	31.58	0.99
1100	1.4	19.92	12.1	2.93	29.16	0.92
1200	1.9	30.68	11.9	2.97	28.22	0.79
1300	5.1	59.87	11.1	3.02	25.07	0.72
1350	7.1	89.92	9.3	3.09	21.33	0.55
1400	9.3	130.86	8.1	3.21	17.79	0.35
1450	12.3	163.35	5.5	3.32	13.16	0.23
1500	13.6	209.86	4.1	3.35	9.8	0.08
1600 (Full-sintered)	18.1	288.92	-	3.37	0.09	0.03

**Table 2** Materials and geometris of tools used

Tool material	Tool geometry	Chamfer
Cemented carbide, K01	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0. 8	0. 065 mm, -20°
Ceramic (TiC added)		
CBN (Ceramic bonded)		0. 06 mm, -20°
S. D. (Sintered diamond)	-5, -5, 15, 15, 15, 15, 0. 8	None

**Table 3** Cutting conditions

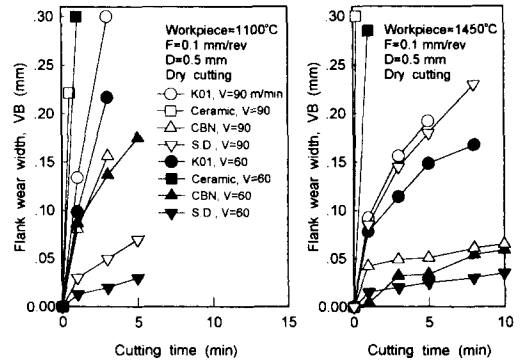
Cutting speed, V	30, 60, 90 m/min
Feed rate, F	0.05~0.1 mm/rev
Depth of cut, D	0.2~1.0 mm

을 변화시켰다. 피절삭재는 건식 및 습식에서 외경 선삭을 행하였다. 건식절삭의 경우는 공구 경사면 상에 생성된 절삭칩을 진공청소기로 흡인하였다. 습식절삭의 경우는 수용성 절삭액(KS W2종)을 1:40의 비율로 희석하여, 매분 8/의 비율로 공구경사면측으로부터 주입하였다. 절삭을 행한 후에 공구 마멸면과 피절삭재의 절삭면을 주사전자현미경 및 광학현미경으로 관찰하였으며, 절삭칩은 2중 테이프에 붙여 금증착을 행하고 주사전자현미경으로 관찰하였다. 공구의 경사면 마멸은 발생되지 않았으므로 여유면 마멸만을 공구현미경으로 측정하였으며, 초경공구를 사용하였을 때의 공구수명은 공구여유면의 최대 마멸폭(VB)이 0.3 mm에 달하는 시간을 기준으로 하였다. 또한 표면거칠기는 접촉식 표면 거칠기 측정기로 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 1100°C 및 1450°C에서 예비소결한 소결체의 건식절삭

Fig. 1에 1100°C 및 1450°C에서 예비소결한 소결체를 각종 공구로 절삭한 때의 공구여유면의 마멸 진행선도를 보여준다. 이 후에는 “1100°C에서 예비소결한 소결체”를 “1100°C 예비소결체”라는 형식으로 기재한다. 1100°C 예비소결체의 절삭에서는 모든 절삭속도에서 세라믹, 초경, CBN 및 다이아몬드공구의 순으로 마멸진행속도가 빨라진다. 그러나 1450°C 예비소결체의 절삭에서는 절삭속도 90 m/min에서 세라믹, 초경, 다이아몬드 및 CBN공구의 순



**Fig. 1** Wear progress curves of various tools in machining of presintered ceramics

으로 마멸진행속도가 빠르고, 60 m/min에서는 세라믹, 초경, CBN 및 다이아몬드공구의 순으로 마멸진행속도가 빨라지며, 절삭속도가 높은 경우는 다이아몬드공구가 CBN공구에 비해 성능이 떨어진 다. 특히 세라믹공구는 1100°C 및 1450°C 이외의 온도에서 예비소결한 소결체의 절삭에서도 1100°C 및 1450°C 예비소결체의 경우와 마찬가지로 공구마멸진행속도가 극히 빠르므로, 고순도 알루미늄 세라믹 예비소결체의 절삭에는 세라믹공구가 적합하지 않다고 할 수 있다. 또한 1450°C 예비소결체에 비해 경도 및 굽힘강도가 낮은 1100°C 예비소결체는 공구마멸의 관점에서 1450°C 예비소결체 보다 피절삭성이 현저히 나쁠을 알 수 있다. 각종 공구의 이러한 마멸특성의 원인에 대해서는 후술한다.

이와 같이 예비소결온도가 다른 소결체의 절삭에서 나타나는 공구수명의 차이에 대응하여 절삭칩 및 절삭면에도 변화가 일어난다. Fig. 2는 예비소결체의 절삭에서 예비소결온도의 차이에 따른 절삭칩의 변화를 보여준다. 1100°C에서 예비소결한 소결체의 절삭에서는 절삭칩이 작은 분말상으로 되며, 피절삭성이 양호한 1450°C에서 예비소결한 소

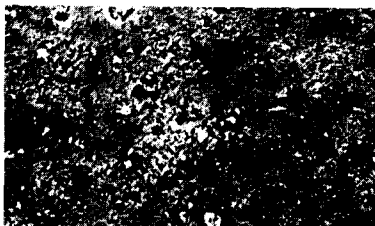


(a) Workpiece=1100°C presintered

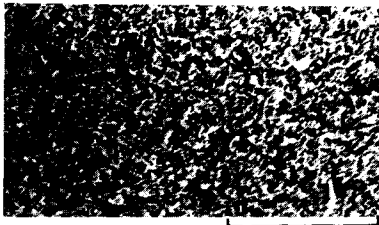


(b) Workpiece=1450°C presintered

**Fig. 2** Shapes of chips in machining of presintered ceramics with cemented carbide tool.  
 $V=90$  m/min,  $F=0.1$  mm/rev,  $D=0.5$  mm,  $T=1$  min, Dry cutting



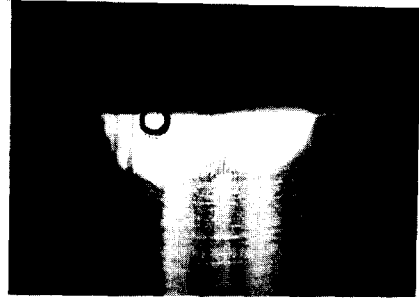
(a) Workpiece=1100°C presintered



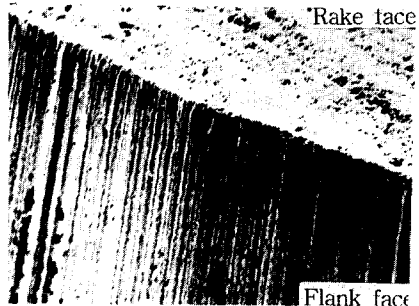
(b) Workpiece=1450°C presintered

**Fig. 3** Finished surfaces in machining of presintered ceramics with cemented carbide tool.  
 $V=90$  m/min,  $F=0.1$  mm/rev,  $D=0.5$  mm,  $T=1$  min, Dry cutting

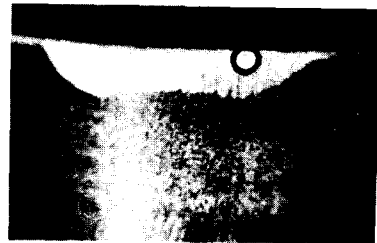
결체에서는 절삭칩의 대부분이 큰 괴상의 형태를 보이며, 미세분말상의 절삭칩은 일부 존재한다. 1100°C 예비소결체는 결정입자간의 결합력이 낮은 상태에 있으므로 절삭시의 미시파괴에 의해 미세분



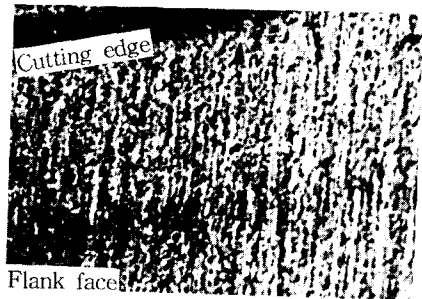
(a) Tool : K01, T=3 min



(b) High magnification of round mark zone of (a)



(c) Tool : CBN, T=3 min

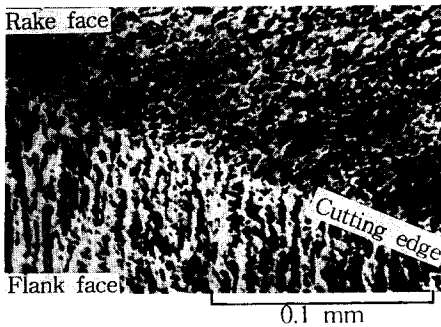


(d) High magnification of round mark zone of (c)

**Fig.4** Continued



(e) Tool : S. D., T=3 min



(f) High magnification of round mark zone of (e)

**Fig. 4** Typical wear patterns of various tools in machining of 1100°C presintered ceramics. Workpiece = 1100°C presintered,  $V = 90$  m/min,  $F = 0.1$  mm/rev,  $D = 0.5$  mm, Dry cutting Micrographs, (a), (c) and (e) exhibit nose radius view

말상의 절삭칩이 생성되며, 1450°C 예비소결체는 1100°C 예비소결체에 비해 결정입자간의 결합력이 높고 강도도 크므로 거시파괴에 의해 절삭칩이 생성되는 것으로 생각된다. 1400°C 이하에서 예비소결한 소결체는 1100°C 예비소결체의 경우와 절삭칩의 형태 및 크기가 유사하였으며, 1500°C 이상에서 예비소결한 소결체는 1450°C 예비소결체의 절삭에서 일부 존재하였던 미세분말상의 절삭칩이 거의 존재하지 않고 큰 괴상의 절삭칩만 존재하는 형태를 보였다. 따라서 절삭시의 미시파괴와 거시파괴의 경계가 되는 예비소결온도는 1400°C와 1450°C의 사이에 있는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 1100°C 및 1450°C에서 예비소결한 소결체를 절삭한 경우의 절삭면의 주사전자현미경 사진을 보여준다. 1100°C 예비소결체의 절삭면은 Fig. 3(a)와 같이 요철이 작고 비교적 평탄하게 되며, 1450°C 예비소결체에서는 Fig. 3(b)에서 보여 주는 바와 같이 요철(凹凸)이 크고, 손상이 현저히 나타

나는 절삭면을 갖는다. 표면거칠기의 측정결과는 1100°C 예비소결체의 최대 표면거칠기가  $4.5 \mu\text{m}$ 이며, 1450°C 예비소결체의 최대 표면거칠기는  $13 \mu\text{m}$ 로 되었다. 이러한 절삭면의 차이는, 절삭칩의 형태로부터도 알 수 있는 바와 같이, 1400°C 이하에서 예비소결한 소결체에서는 결정입자 사이의 결합력이 약해 미시파괴에 의해 절삭이 행해지므로 절삭면의 하방으로 균열이 진전 및 성장하기 어렵고, 1450°C 이상에서 예비소결한 소결체에서는 예비소결체의 소결이 상당히 진행되어 어느 정도의 결정입자간 결합력과 강도를 가지므로, 절삭시에 거시파괴가 일어나고 거시균열이 절삭면의 하방으로 진전하기 때문에 절삭면의 요철 및 손상이 커지는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 1100°C에서 예비소결한 소결체를 절삭한 경우의 각종 공구의 마멸형태 및 마멸면의 확대 사진을 보여주며, 1450°C에서 예비소결한 소결체를 절삭한 때의 각종 공구의 마멸형태 및 마멸면의 확대 사진을 Fig. 5에 보여주는데, 세라믹공구의 마멸형태는 1100°C 및 1450°C 예비소결체의 절삭에서 유사한 경향을 보여 주었으므로 1450°C 예비소결체를 절삭한 경우만을 나타내었다.

초경공구는 모든 온도에서 예비소결한 소결체의 절삭에서 예리한 절삭날을 유지하였으며, Fig. 4(a),(b)에서 보여주는 바와 같이 1100°C 예비소결체를 절삭한 경우, 공구여유면은 피절삭재의 회전 방향으로 얇은 홈패임(ploughing) 흔적을 보이며, 1450°C 예비소결체를 절삭한 공구는 Fig. 5(a),(b)와 같이 여유면이 깊은 홈(groove) 형상으로 마멸된 형태를 보여준다. 1100°C 예비소결체를 절삭한 경우는 미시파괴에 의해 절삭칩의 크기가 작고 절삭칩의 배출성이 나빠져 피절삭재와 공구여유면 사이로 절삭칩의 침입이 용이하게 되고, 침입한 절삭칩과 공구여유면과의 마찰에 의해 공구여유면의 홈패임이 발생하기 때문에 공구마멸이 현저히 빨라지며, 또한 미시파괴에 의해 피절삭재와 공구여유면과의 접촉도 많아지기 때문에 공구마멸이 더욱 촉진되는 것으로 생각된다. 1450°C 예비소결체를 절삭한 경우의 초경공구는 일정한 간격으로 깊은 홈형상의 마멸이 형성되어 있는데, 1450°C 예비소결체의 절삭에서는 절삭시의 거시파괴에 의해 절삭칩의 크기가 증가하여 절삭칩의 배출성이 용이하며 피절삭재와 공구여유면 사이로 절삭칩의 침입이 어렵게 되어, 절삭날의 전면에 걸쳐 절삭칩이 침입하

지 못하고 일부분의 절삭날에서 마멸 및 손상이 일어나면 그 부분으로 집중적으로 절삭칩이 침입하기 때문에 일정간격의 깊은 홈상마멸이 발생한다고 생각된다. 따라서 1450°C 예비소결체의 경도 및 강도가 1100°C 예비소결체에 비해 높음에도 불구하고 Fig. 1에서 1450°C 예비소결체를 절삭한 초경공구의 마멸속도가 1100°C 예비소결체의 경우에 비해 낮게 된 원인은 1450°C 예비소결체의 절삭에서는 1100°C 예비소결체의 절삭시 보다 공구여유면으로의 절삭칩의 침입이 적게 되며 또한 거시과괴에 의해 피절삭재와 공구여유면과의 접촉이 작아지기 때문으로 생각된다.

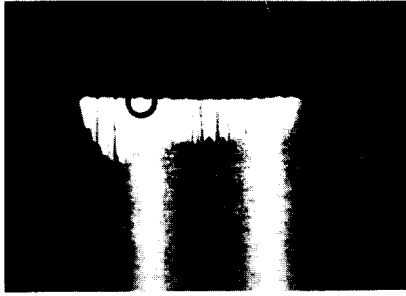
한편 세라믹공구로 1450°C 예비소결체를 절삭하였을 때의 마멸형태는 Fig. 5(a),(b)에서 보여주는 바와 같이 절삭시에 공구 절삭날 자체가 없어지고, 마멸면에는 홈패임 흔적과, 공구입자의 탈락 및 연삭마멸(abrasive wear)이 심하게 일어났음을 보이며, 다른 온도에서 예비소결한 소결체를 절삭한 경우도 유사한 경향을 보였다. 예비소결체의 절삭에서 세라믹공구의 수명이 대단히 짧게 된 원인은, 세라믹공구의 인성이 낮아 절삭날의 손상이 발생하기 쉽고, 절삭날의 손상에 의해 피절삭재와 공구여유면 사이로 쉽게 침입된 절삭칩이 공구여유면을 마찰할 때에 공구여유면에서 홈패임(ploughing)을 일으키기 때문에 공구입자의 탈락이 용이하게 일어나며, 세라믹 예비소결체의 결정입자간의 결합력은 낮지만 결정입자 자체의 경도는 예비소결의 단계에서도 매우 높아 세라믹공구를 용이하게 연삭마멸시키기 때문으로 판단된다.

CBN공구로 1100°C 예비소결체를 절삭한 경우는 Fig. 4(c),(d)에서 보여주는 바와 같이 균일한 여유면 마멸형태를 보이며, CBN공구 마멸면의 확대사진은 공구여유면에 피절삭재의 회전방향으로 미세한 홈패임이 발생하였음을 보이며, 이것은 공구여유면으로 침입한 절삭칩이 공구여유면의 홈패임을 일으키기 때문으로 생각된다. 그러나 CBN공구를 사용하여 1450°C 예비소결체를 절삭한 경우는 Fig. 5(e),(f)에서 보여주는 바와 같이 공구 절삭날의 손상이 적고 예리한 절삭날이 유지되며, 전술한 바와 같이 절삭칩이 크고 배출성이 좋아 공구여유면으로 절삭칩이 침입하기 어렵게 되므로 미세홈상의 마멸보다 여유면의 균일한 연삭마멸과(abrasive wear)와 공구입자의 국부적 탈락에 의해 공구수명이 달하는 것으로 판단된다. 또한 CBN공구는 초

경 및 세라믹공구에 비해 내마멸성은 크나 일반적으로 인성이 낮기 때문에 절삭날의 손상이 발생하기 쉬우나 1450°C 예비소결체의 굽힘강도가 약 163 MPa로서 그다지 높지 않으며, 또한 CBN공구의 경도가 1450°C 예비소결체의 결정입자 경도에 비해 매우 높기 때문에 절삭날의 손상 및 마멸이 작고 예리한 상태를 유지하는 것으로 생각된다. 따라서 1450°C 예비소결체의 절삭에서 배출성이 좋은 큰 절삭칩이 공구여유면으로 침입하기 어렵고 공구입자의 탈락보다 연삭마멸이 주 마멸기구로 되기 때문에 CBN공구의 마멸속도가 다른 공구를 사용한 경우보다 현저히 낮아지는 것으로 생각된다. CBN공구에서도 초경공구를 사용한 절삭과 마찬가지로 1100°C 예비소결체의 절삭에서 절삭칩의 침입이 많고 피절삭재와 공구여유면과의 접촉이 많기 때문에 1450°C 예비소결체의 경우 보다 공구마멸속도가 현저히 빨라진 것으로 사료된다.

다이아몬드공구로 1100°C 예비소결체를 절삭한 때는 Fig. 4(e),(f)에서 보여주는 바와 같이 초경 및 CBN공구로 절삭한 경우와 마찬가지로 균일한 여유면 마멸형태로 되고 미세 홈패임이 나타나는 마멸면으로 되어 있으며, 1450°C 예비소결체를 절삭한 경우는 Fig. 5(g),(h)에서 보여주는 바와 같이 절삭속도 90 m/min에서는 절삭온도가 다이아몬드의 탄화온도 이상의 고온에 달하여 국부적으로 다이아몬드입자에 탄화가 발생하며, 따라서 다이아몬드의 내마멸성이 저하되어 다이아몬드입자의 연삭마멸이 심하게 발생되고 다이아몬드입자가 집중적으로 탈락된 양상을 나타낸다. 따라서 Fig. 1에서 보여준 바와 같이 1450°C 예비소결체를 절삭한 경우 절삭속도 60 m/min에서는 다이아몬드공구의 공구마멸속도가 CBN공구에 비해 다소 늦었으나, 절삭속도 90 m/min에서는 다이아몬드공구의 마멸 진행속도가 CBN공구에 비해 상당히 빨라지는 것은, 절삭속도 90 m/min에서는 절삭온도가 국부적으로 다이아몬드의 탄화온도 이상이 되어 다이아몬드의 내마멸성이 크게 약화될 때문으로 생각된다. 다이아몬드공구를 사용하여 1100°C 예비소결체를 절삭속도 90 m/min으로 절삭하는 경우는 1450°C 예비소결체를 동일 속도로 절삭한 경우 보다 공구마멸진행속도가 늦어지는데 이것은 1100°C 예비소결체의 경도 및 강도가 1450°C 예비소결체에 비해 낮아서 절삭온도가 낮아지기 때문으로 생각된다.

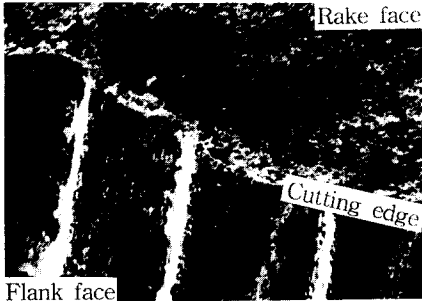
한편 1400°C 이하의 각종 온도에서 예비소결한



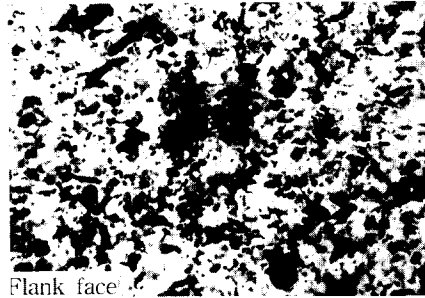
(a) Tool : K01, T=13 min



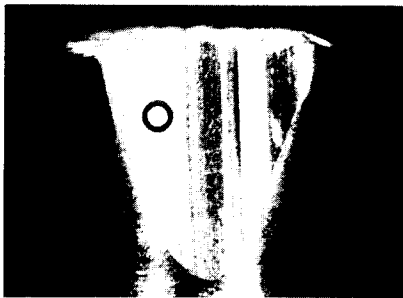
(e) Tool : CBN, T=10 min



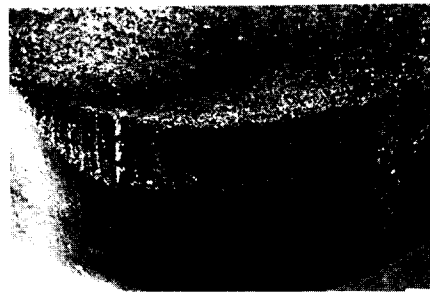
(b) High magnification of round mark zone of (a)



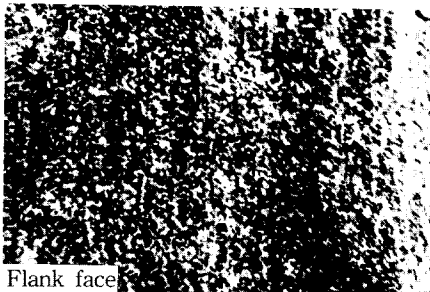
(f) High magnification of round mark zone of (e)



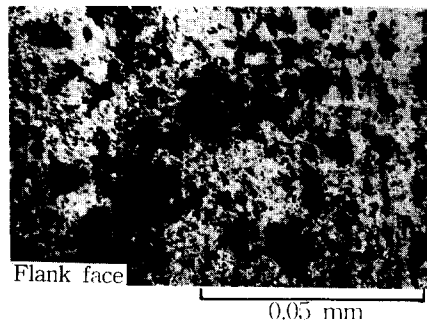
(c) Tool : Ceramic, T=0.3 min



(g) Tool : S. D. , T=13min



(d) High magnification of round mark zone of (c)



(h) High magnification of round mark zone of (g)

Fig. 5 Typical wear patterns of various tools in machining of 1450°C presintered ceramics. Workpiece =1450°C presintered, V =90m/min, F =0.1 mm/rev, D=0.5 mm. Dry cutting Micrographs, (a), (c), (e) and (g) exhibit nose radius view

소결체의 절삭에서 모든 공구는 1100°C 예비소결체를 각각 동종의 공구로 절삭한 때와 유사한 마멸 형태를 보였다.

3.2 각종 온도에서 예비소결한 소결체의 건식절삭

Fig. 6은 각종 온도에서 예비소결한 소결체를 초경공구로 절삭한 때의 공구수명선도를 보여준다. 1500°C에서 예비소결한 소결체를 제외한 모든 예비소결체의 절삭에서 공구수명선도의 경사는 거의 1에 가깝게 된다. 성형체 및 1450°C에서 예비소결한 소결체의 공구수명이 가장 길고, 다른 예비소결체는 모두 동일 정도의 짧은 수명을 보인다. 1500°C 예비소결체는 절삭속도 30 m/min에서는 성형체 및 1450°C 예비소결체와 유사한 피절삭성을 보이나, 절삭속도 60 m/min 이상에서는 성형체 및 1450°C 예비소결체에 비해 피절삭성이 현저히 저하된다.

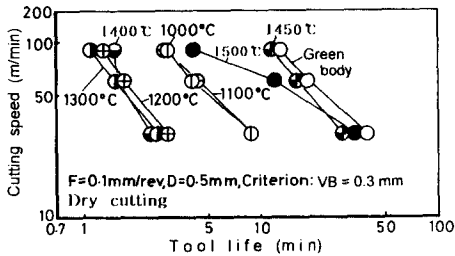


Fig. 6 Tool life curves of cemented carbide tool in machining of unsintered and presintered ceramics

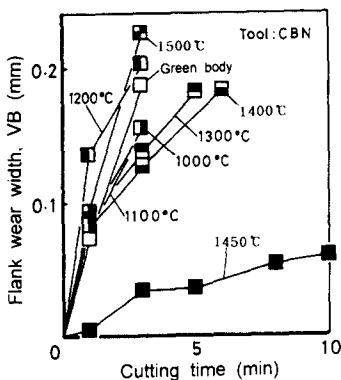
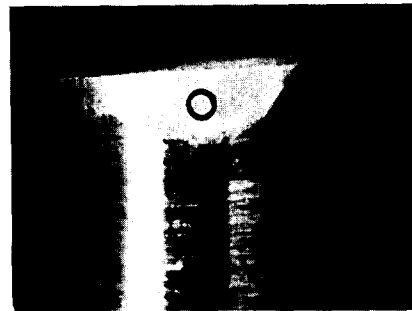


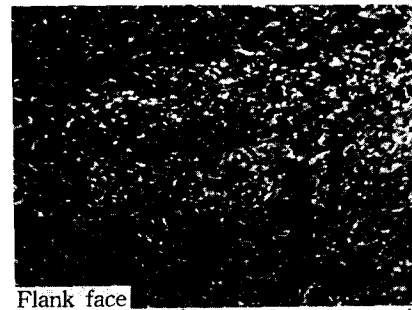
Fig. 7 Wear progress curves of CBN tool in machining of the ceramics presintered at various temperatures. V=90 m/min, F=0.1 mm/rev, D=0.5 mm, Dry cutting

따라서 초경공구로 절삭하는 경우에 공구마멸속도와 완전소결시의 수축률을 모두 고려한다면 1450°C 예비소결체의 피절삭성이 가장 유리하다고 판단된다.

CBN공구는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 1100°C 및 1450°C에서 예비소결한 소결체의 절삭에서 초경공구 보다 우수한 성능을 보여주었다. CBN공구를 사용하여 각종 온도에서 예비소결한 소결체를 절삭



(a) Tool : K01, T=5 min



(b) High magnification of round mark zone of (a)



(c) Tool : CBN, T=3 min

Fig. 8 Typical wear patterns of cemented carbide and CBN tools in machining of 1500°C presintered ceramics. V=90 m/min, F=0.1 mm/rev, D=0.5 mm, Dry cutting, Micrographs, (a) and (c) exhibit nose radius view



한 때의 공구여유면의 마멸진행선도를 Fig. 7에 보여준다. 1450°C 예비소결체 이외에는, 성형체를 포함하여 마멸진행속도가 거의 동일 정도로서 상당히 크게 됨에 비해, 1450°C 예비소결체를 절삭한 경우의 마멸진행속도가 가장 늦어짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 1500°C에서 예비소결한 소결체를 절삭한 경우의 초경공구와 CBN공구의 마멸형태를 보여준다. 초경공구는 절삭날의 손상은 적으나 Fig. 8(b)에서 보여주는 바와 같이 마멸면은 요철이 많고, 요철의 오목부분은 초경공구의 결정입자가 국부적으로 탈락된 것이며, 마멸면에 심한 연삭마멸이 발생하였음을 알 수 있다. 또한 Fig. 8(c)의 CBN공구의 마멸형태는 절삭날이 존재하지 않으며 공구여유면이 상당히 후퇴된 상태로 되었다. CBN공구는 초경공구에 비해 인성이 낮으므로, 1500°C 예비소결체의 강도 및 경도가 1450°C 예비소결체에 비해 높아서 절삭 초기에 절삭날이 심한 손상을 받고 절삭칩이 용이하기 침입하여 공구여유면의 마멸을 촉진시키기 때문에 공구마멸진행속도가 1450°C 예비소결체에 비해 현저히 빨라지는 것으로 생각된다. 한편 초경공구를 사용하여 1500°C 예비소결체를 절삭한 경우의 절삭칩은 전술한 바와 같이 1450°C 예비소결체와 마찬가지로 큰 괴상의 형태를 보여주나 1450°C 예비소결체의 절삭에서는 소량이 포함되어 있는 미세분말상의 절삭칩은 거의 존재하지 않으므로, 절삭칩의 배출성이 양호하고 절삭날의 손상이 적어 절삭칩의 공구여유면으로의 침입도 거의 없으며, 절삭시의 거시파괴에 의해 피절삭재와 공구여유면과의 접촉도 적어지지만 1500°C 예비소결체는 경도 및 강도가 매우 높기 때문에 피절삭재와 초경공구 여유면의 마찰에 의한 연삭마멸이 촉진되어 1450°C 예비소결체의 절삭에 비해 공구마멸진행속도가 현저히 빨라진 것으로 생각된다.

### 3.3 1450°C에서 예비소결한 소결체의 습식절삭

Fig. 9에 각종공구를 사용하여 피절삭성이 가장 양호한 1450°C에서 예비소결한 소결체를 습식절삭한 경우의 공구여유면의 마멸진행선도를 보여준다. 세라믹공구를 사용한 경우는 습식절삭에서도 건식절삭과 마찬가지로 공구마멸진행속도가 현저히 빨라진다. 초경 및 CBN공구를 사용한 경우는 건식절삭 보다 습식절삭의 경우가 마멸진행속도가 현저히 빨라지며, 이것에 반하여 다이아몬드공구를 사용한 경우는 건식절삭에 비해 습식절삭의 경우가

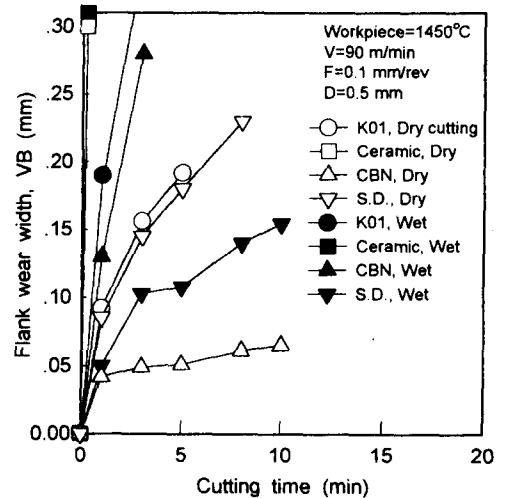


Fig. 9 Wear progress curves of various tools in wet and dry machining of 1450°C presintered ceramics

공구마멸진행속도가 현저히 느려진다. 각종 공구를 사용하여 1450°C 예비소결체를 건식 및 습식절삭한 결과를 통합하여 본다면 CBN공구의 건식절삭 성능이 가장 우수하다고 할 수 있다.

한편 건식절삭시의 절삭칩의 배출상태는 공구 경사면으로부터 절삭칩이 힘있게 배출되었다. 이것에 반하여, 습식절삭한 때는 점토상으로 되어 공구 경사면으로부터 밀려나오는 상태로 되기 때문에, 건식절삭에 비해 절삭칩의 배출성이 극히 악화된다. 또한 예비소결체는 소결이 완전히 되지 않은 상태이므로 습식절삭시에 수분을 흡수하여 피절삭재의 인성이 커지게 되며, 따라서 습식절삭시의 파괴가 미시파괴로 됨에 따라 절삭칩이 미세분말형으로 되어 공구여유면으로 절삭칩이 침입하기 쉽고 또한 피절삭재와 공구여유면의 접촉이 많아지게 되어, 초경 및 CBN공구는 건식절삭에 비해 습식절삭에서 공구마멸진행속도가 현저히 빨라지는 것으로 판단된다. 다이아몬드공구를 사용한 경우에 습식절삭시의 공구성능이 건식절삭에 비해 현저히 양호하게 되는 것은 건식절삭에서는 전술한 바와 같이 절삭속도 90 m/min에서 절삭온도가 다이아몬드의 탄화온도에 달하였으나, 습식절삭에서는 절삭유의 냉각효과에 의해 다이아몬드의 탄화가 억제된 때문으로 사료된다. 그러나 다이아몬드공구를 사용한 습식절삭에서는 상술한 바와 같이 절삭칩의 배출성이 나쁘고, 공구여유면과 피절삭재와의 접촉이 많아지

로 다이아몬드공구의 습식절삭에서의 성능은 CBN 공구를 사용한 건식절삭보다 나쁜 결과를 보이는 것으로 생각된다. 한편 이러한 습식절삭시의 수분 흡수는 완전소결전에 자연건조를 행함에 의해 탈수되므로, 완전소결품의 물리적 및 기계적 성질에는 전혀 영향을 미치지 않았다.

3.4 절삭깊이 및 이송속도의 영향

Fig. 10에 절삭깊이를 0.2, 0.5 및 1.0 mm로 변화시킨 경우의 공구여유면의 마멸진행선도를 보여준다. 1350°C에서 예비소결한 소결체의 절삭에서는 절삭깊이의 변화에 따른 영향이 보이지 않는다. 또한 1450°C에서 예비소결한 소결체의 절삭에서는 절삭깊이가 0.5 mm인 경우의 마멸진행속도가 다소 늦어지나, 그다지 큰 영향은 없는 것으로 생각된다.

이송속도를 0.05, 0.1 및 0.2 mm/rev으로 변화시킨 때의 공구여유면의 마멸진행선도를 Fig. 11에 보여준다. 절삭깊이의 경우와 마찬가지로 1350°C에서 예비소결한 소결체에서는 이송속도의 영향이 그다지 나타나지 않고, 1450°C에서 예비소결한 소결체에서도 이송속도 0.05 mm/rev에서 마멸진행속도가 다소 빨라지지만, 그다지 큰 차는 없는 것으로 말할 수 있다. 또한 다른 온도에서 예비소결한

소결체에 대하여도 동일한 실험을 행하였으나, 절삭깊이 및 이송속도의 영향은 나타나지 않았다. 이상의 결과로부터 본 논문의 절삭조건 범위에서는 절삭깊이 및 이송속도를 변화시키는 것에 의한 공구수명의 증가를 기대할 수는 없는 것으로 생각된다.

3.5 절삭종료후의 예비소결체를 완전소결한 경우의 절삭면의 표면거칠기 변화

세라믹과 같이 경도가 높고 취성이 큰 재료를 절삭했을 때의 표면상태는 강도에 큰 영향을 미치므로 예비소결체 및 완전소결체의 절삭면 표면거칠기는 피절삭성을 평가하는데 매우 중요한 평가요소로 된다. 1100°C 및 1450°C에서 예비소결한 소결체를 절삭한 때의 절삭면의 최대 표면거칠기는 각각 4.5 μm 및 13 μm이며, 1100°C 및 1450°C에서 예비소결한 소결체를 절삭한 후에 1600°C에서 2시간 완전소결을 행하였을 때의 최대 표면거칠기는 각각 2.5 μm 및 5 μm로 되었다. 이것은 완전소결에 의해 예비소결체의 절삭면의 표면거칠기가 현저히 작아짐을 나타내는 것인데, 예비소결체의 절삭 후에 완전 소결을 행한 절삭 표면은 완전소결을 행하기 전에 비해 이송 흔적이 매우 작게 나타나 있으며, 표면손상이 상당히 소멸되었다. 또한, 예비소결체

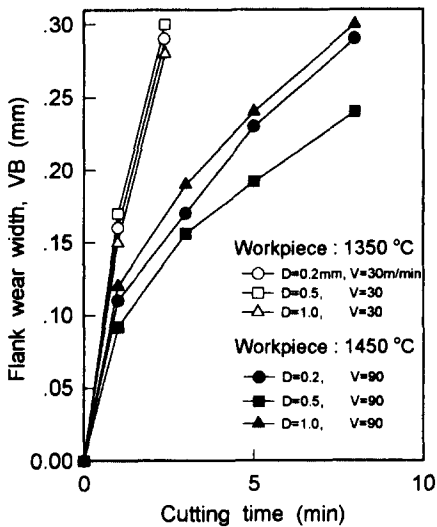


Fig. 10 Effect of the depth of cut on tool wear in machining of presintered ceramics with cemented carbide tool. F=0.1 mm/rev, Dry cutting

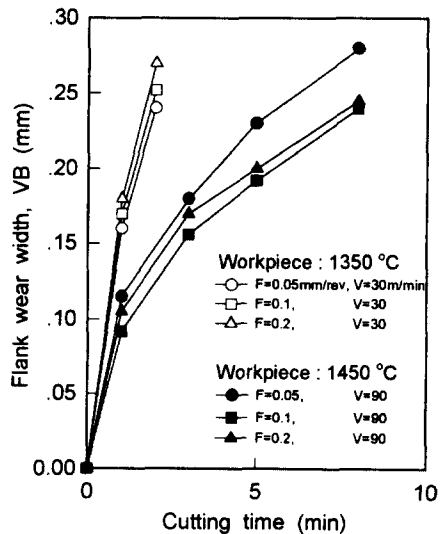


Fig. 11 Effect of the depth of cut on tool wear in machining of presintered ceramics with cemented carbide tool. D=0.5 mm, Dry cutting

를 완전 소결함에 따른 표면거칠기의 저하는 저온에서 예비소결한 소결체보다 고온에서 예비소결한 소결체에서 더욱 현저히 나타나며, 1450°C 예비소결체의 경우는 절삭 후의 완전소결에 의해 표면 거칠기가 완전 소결전의 약 1/3로 되어 절삭면의 상태가 크게 향상되었다. 한편, 완전소결체를 절삭속도 60 m/min, 이송속도 0.05 mm/rev, 절삭깊이 0.3 mm로 절삭한 경우는, 이송속도 및 절삭깊이를 예비소결체의 절삭에 비해 작게 하였음에도 불구하고, 최대 표면거칠기가 19  $\mu\text{m}$ 로서 1450°C 예비소결체의 최대 표면거칠기인 13  $\mu\text{m}$ 에 비해 현저히 크게 되었다.

#### 4. 결 론

각종공구로 예비소결체의 절삭실험을 행한 결과, 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

- (1) 세라믹공구로 예비소결체를 절삭하는 경우, 예비소결온도에 관계없이 공구수명이 극히 짧게 되어, 모든 공구중에서 가장 나쁜 성능을 보여 주었다.
- (2) 초경 및 CBN공구에 의한 건식절삭에서는, 1450°C 부근의 온도에서 예비소결한 소결체에서 공구수명이 가장 길게 된다.
- (3) 초경 및 CBN공구는 습식절삭에 비해 건식절삭의 경우가 공구수명이 길어지며, 다이아몬드공구는 건식절삭에 비해 습식절삭의 경우가 공구수명이 길게 된다. 각종 예비소결온도의 소결체를 각종 공구로 건식 및 습식절삭한 경우, 1450°C 예비소결체를 건식절삭한 CBN공구의 성능이 가장 우수하다.
- (4) 절삭면은, 피상의 절삭칩이 형성되는 1450°C 이상에서 예비소결한 소결체 보다, 미세분말상의 절삭칩이 생성되는 1400°C 이하에서 예비소결한 소결체의 경우가 양호하다.

(5) 절삭깊이 및 이송속도는 공구수명에 그다지 영향을 미치지 않는다.

(6) 고온에서 예비소결한 소결체의 절삭 후에 완전소결을 행하면, 절삭에 의한 표면거칠기는 약 1/3의 크기로 작아진다. 또한 예비소결체 절삭시의 표면거칠기는 완전소결체의 절삭시에 비해 현저히 작다.

#### 참고문헌

- (1) Li, K. and Liao, W., 1996, "Surface/Subsurface Damage and the Fracture Strength of Ground Ceramics," *J. Materials Processing Technology*, Vol. 57, pp. 207~220.
- (2) Strakna, T. J., Jahanmir, S., Allor, R. L. and Kumar, K. V., 1996, "Influence of Grinding Direction on Fracture Strength of Silicon Nitride," *Trans, ASME, J. Eng. Mat. Tech.*, Vol.118, July, pp. 335~342.
- (3) Malkin, S. and Ritter, J. E., 1989, "Grinding Mechanisms and Strength Degradation for Ceramics," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 167~174.
- (4) Halcomb, D. L. and Rey, M. C., 1982, "Ceramic Cutting Tools for Machining Unsintered Compacts of Oxide Ceramics," *Ceramic Bulletin*, Vol. 61, No. 12, pp. 1311~1314.
- (5) 飯島 昇, 竹山秀彦, 柏瀬雅一, 1984, "焼結ダイヤモンド工具の切削性能と摩耗解析(第2報)-焼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. 1469~1474.
- (6) 渡邊政嘉, 吉川昌範, 1990, "ダイヤモンドコ-テイング切削工具によるセラミックスの切削," *日本精密工學會誌*, Vol. 56, No. 9, pp. 1735~1740.