

탄소 소결체의 피절삭성

김성형*, 이재우**

Machinability of Sintered Carbon

Sung-Chung Kim, Jae-Woo Lee

Abstract

This paper deals with the machinability based on turning and drilling tests. The main conclusions obtained were as follows. (1) Turning : The roughness of machined surface decreases with the increase of the rake angle of tools, and the tool wear becomes smaller with the decrease of the rake angle. When the feed rate becomes larger, the fracture of work material in the vicinity of the cutting edge occurs on a larger scale, eventually decreasing tool wear. (2) Drilling : Considering both tool life and productivity, it is reasonable to cut with the high cutting speed and feed rate. The tool wear increases with the increase of feed rate, and the tendency of feed rate on tool wear becomes stronger at the cutting speed $\geq 30\text{m/min}$.

Keywords : Sintered carbon(탄소 소결체), Tool life(공구 수명), Turning(선삭), Milling(밀링 가공), Drilling(드릴 가공), Machinability(피절삭성)

1. 서 언

탄소 소결체는 자기 윤활성, 도전성, 열전도성, 내열성, 화학적 안정성, 열팽창 등에 대하여 우수한 성질을 가지고 있기 때문에 방전가공용 전극, 원자로의 심재,

반도체용 지그, 브러시, 미케니컬 시일 등에 이용되고 있으며 최근의 탄소 소결체의 성질 향상에 동반하여 그 용도 개발이 활발히 행해지고 있다. 연질의 탄소 소결체는 오래 전부터 사용되었으며 절삭시의 공구 수명의 관점에서는 그다지 문제가 되지 않는다. 그러나 최근에 개발되어 많이 사용되고 있는 경질의 탄소 소결체는 난삭재로서 절삭가공시에 공구 수명이 매우 짧게 되어 자동화 및 생산성의 관점에서 큰 문제로 되어 있으며 피절삭성 향상을 위한 대책이 시급히 요구되고 있다.

* 충북대학교 정밀기계공학과
** 두원공업전문대학 기계과

탄소 소결체의 물리적, 화학적 및 기계적 성질에 관해서는 많은 연구 보고가 행해져 왔다^{(1), (2)}. 그러나 탄소 소결체의 피절삭성에 관한 연구보고⁽³⁾⁻⁽¹¹⁾는 그다지 없으며 더구나 탄소 소결체의 드릴링 절삭시의 피절삭성에 관한 연구보고는 거의 발견되지 않으므로 절삭조건, 공구 재종 및 공구형상의 선정이 어렵다. 黒島등에 의한 연구보고에서는⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾ 절삭속도의 증대에 따라 마모진행 속도가 감소한다는 마모의 특성이 보고되어 있고 또한 布施⁽¹⁰⁾는 탄소 소결체의 절삭에서 CBN공구도 마모가 현저하게 일어난다는 연구보고를 행한바 있다. 이러한 경취재료의 절삭기구는 강재와 전혀 다르기 때문에 탄소 소결체의 절삭현상은 아직 많은 의문점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 탄소 소결체중에서 가장 경취성이 높아 난삭재로 되어 있는 탄소질과 흑연질이 혼합된 탄소흑연질의 탄소 소결체에 대하여 선삭 및 드릴링을 행하고 절삭조건, 공구재종 및 공구형상의 영향을 검토하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 탄소 소결체는 탄소질이 흑연질 보다 약간 많은 비율로 혼합, 소결한 후 수지를 함침 시킨 탄소흑연질로서, 그것의 물리적 및 기계적 성질을 Table 1에 보여준다.

Fig. 1은 탄소 소결체의 SEM 사진을 보여 주며 Fig. 1(a)는 파면의 조직 사진 Fig. 1(b)는 폴리싱 후 HCl 용액으로 에칭 처리한 조직사진을 보여 주며 각 결정 입자가 치밀하게 접합되어 있고 건전한 조직임을 알 수 있다. 선삭용 공작물의 치수와 형상은 (외경) $\phi 80 \times$ (길이)140 mm 으로서 중공 원통이었다. 선삭 실험에서의 공구 및 실험 조건은 Table 2에 보여 주는 바와 같으며, 선삭실험에서 사용한 공구재료는 초경, 세라믹, CBN 및 소결다이아몬드공구로서, CBN공구의 경우는 공구 경사각의 영향을 조사하기 위하여, 공구의 경사각을 마이크로 다이아몬드 공구연삭기로 변화시켰다. 절삭칩 크기의 측정은 주사현미경상의 대각선에 걸쳐 있

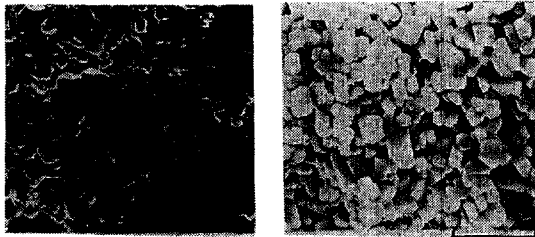
Table 1. Physical and mechanical properties of sintered carbon

Shore hardness	Bending strength MPa	Compressive strength MPa	Young's modulus GPa	Density g/cm ³		Porosity %		Specific gravity	Thermal conductivity W/m · K
				Bulk	True	Total	Surface		
95	52	180	13	1.62	2.02	18.1	15.1	1.82	29.5

Table 2. Turning conditions

Conditions \ Tool	Tungsten Carbide, K01	Ceramic	CBN	Sintered diamond
Tool shape, Type 1	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8	-5, -5, 5, 5, 15, 15
Type 2	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 2.0			0.8
Type 3	Round tool R=5.0mm ($\alpha = -5^\circ, \gamma = 5^\circ$)			
Variation of rake angle, α (°)	—	—	-35, -25, -15, -5, 0, 5	—
Chamfer angle (°)	—	15	15	15
Land width(mm)	—	0.15	0.15	0.15
Cutting speed(m/min)	60, 90	90	60, 90, 110	90
Feed rate, F(mm/rev)	0.03	0.03	0.03	0.03
Depth of cut, D(mm)	0.2	0.2	0.2	0.2

는 80개의 절삭칩에 대해 대각선 방향의 길이를 측정하여 평균값을 취하였다.



(a) fractured surface (b) polished and etched surface
Fig 1. Microstructures of sintered carbon

한편, 드릴링 실험에서는 초경합금의 드릴을 사용하였으며, 실험시는 드릴의 돌출 길이가 항상 일정(35mm)하도록 하였다. 드릴 가공 실험에서는, 두께 20mm의 판재를 판통시켰으며, 절삭 조건으로서는, 절삭속도를 10~50m/min, 이송속도를 0.1~0.3mm/rev의 범위로 변화시켰다.

선삭은 무단변속선반에서 행하였으며 드릴링 실험은 머시닝센터에서 행하였다. 본 실험에서의 모든 절삭은 건식에서 행하였으며, 생성되는 절삭칩은 절삭 시에 진공청소기에 의해 흡인하였다. 표면거칠기의 측정은 축침식 표면거칠기계(Osakada SE-4)를 사용하였으며, 측정방향은 선삭과 드릴실험 모두 이송방향이며 각각 다른 위치에서 10회 측정한 최대표면거칠기의 평균값을 구하였다. 절삭저항은 AST식 공구동력계를 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 선삭 실험

Fig. 2는 초경, 세라믹, CBN 및 소결다이아몬드공구를 사용하여 절삭한 경우의 공구 여유면의 마모진행곡선을 보여준다. 세라믹공구의 마모진행속도가 가장 빠르고 초경공구는 세라믹공구에 비해 약 1/2의 마모진행속도를 보여주나 역시 공구 성능이 좋지 않음을 알 수 있다. CBN 및 소결다이아몬드공구는 절삭길이 약 500m에 이르기까지의 초기마모는 상당히 크게 나타나 있으나 정상마모에 있어서의 마모진행속도는 CBN공구와 소결다이아몬드공구가 거의 동일 정도로서 상당히 우수한 성

능을 발휘한다. CBN공구 및 소결다이아몬드공구에서 초기 마모가 크게 된 원인은 고온경도, 열전도율 및 형상이 크게 영향을 미친 것으로 생각되어 진다.

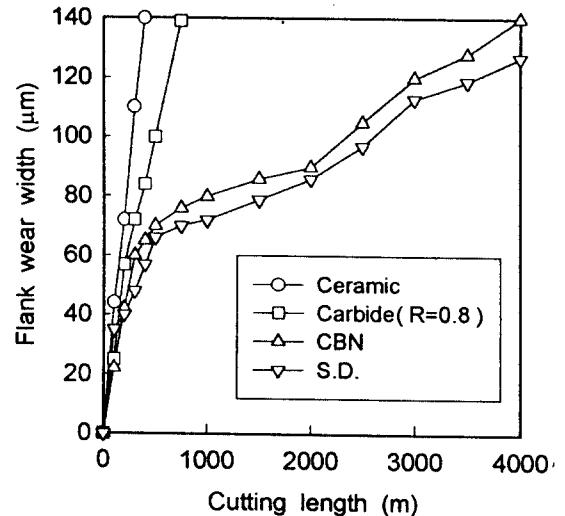


Fig 2. Effect of cutting length on flank wear width in turning
V=90m/min, F=0.03mm/rev, D=0.2mm

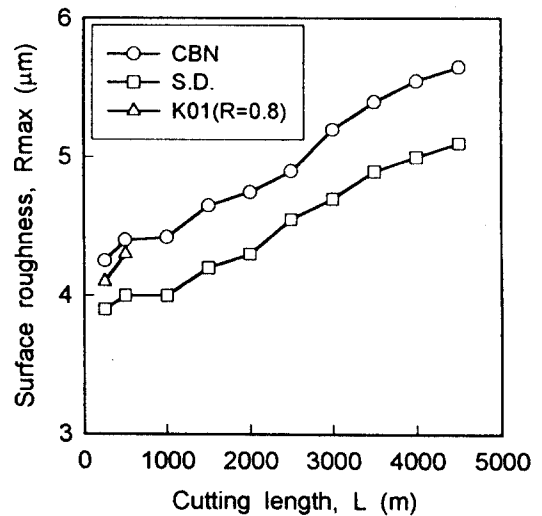


Fig 3. Relation between cutting length and surface roughness in turning
V=90m/min, F=0.03mm/rev, D=0.2mm

Fig. 3은 상기의 절삭에 있어서 절삭면의 최대 표면 거칠기와 절삭 거리의 관계를 보여준다. 소결다이아몬드 공구와 CBN공구는 절삭거리의 증대에 따라 최대표면거칠기가 거의 동일한 간격을 유지하고 있으며 모든 절삭 거리에서 유사한 표면 거칠기를 보여 준다.

Fig. 4는 CBN공구의 경사각과 절삭면의 최대표면거칠기와의 관계를 보여준다. 경사각이 5° 에서 최대표면 거칠기가 2 μ m 으로서 가장 작게 되며 경사각이 -방향으로 크게 됨에 따라 최대표면거칠기가 급속히 증대됨을 알 수 있다. 그래서 공구수명이 소결다이아몬드공구와 더불어 가장 긴 CBN공구의 절삭날에 경사각을 -15°, -25° 및 -35° 로 변화시켜 절삭을 행하여 공구 마모에 미치는 영향을 조사한 결과를 Fig. 5에 보여준다. 정상마모에서의 기울기는 세 공구에서 거의 동일한 경향을 보여주고 있으나, 초기마모는 경사각이 -방향으로 크게 됨에 따라 현저히 작아짐을 알 수 있다. Fig. 6은 CBN공구 경사각의 변화에 따른 절삭칩의 변화를 조사한 결과이다. 공구의 경사각이 -35° 인 경우에 -15° 인 경우에 비해 절삭칩의 크기가 약 4배로 되었으며 경사각이 -방향으로 커짐에 따라 절삭칩의 크기가 현저히 증대됨을 알 수 있었다. 이와 같이 공구의 경사각이 증대됨에 따라 공구의 마모진행속도가 늦어지는 원인은 공구의 경사각이 크게 됨에 따라 절삭시의 파괴 구

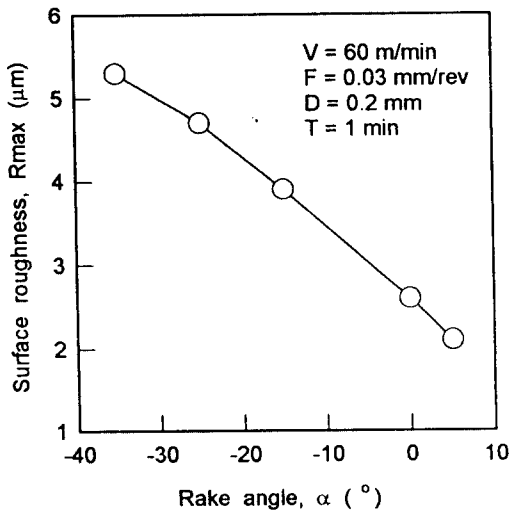


Fig. 4 Effect of the rake angle of CBN tool on surface roughness in turning

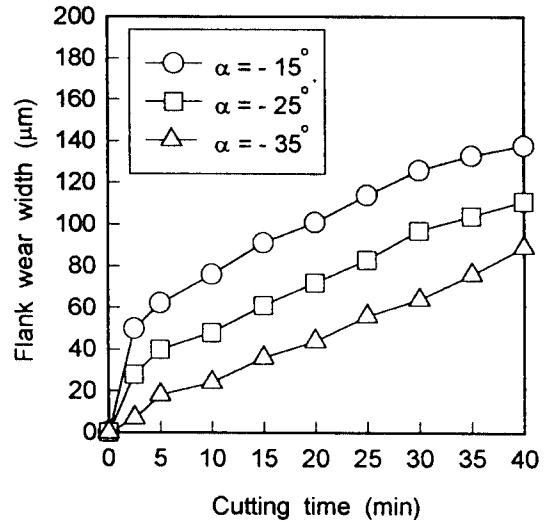


Fig. 5 Wear progress curves of CBN tools with different rake angle in turning
 $V=110$ m/min, $F=0.03$ mm/rev, $D=0.2$ mm

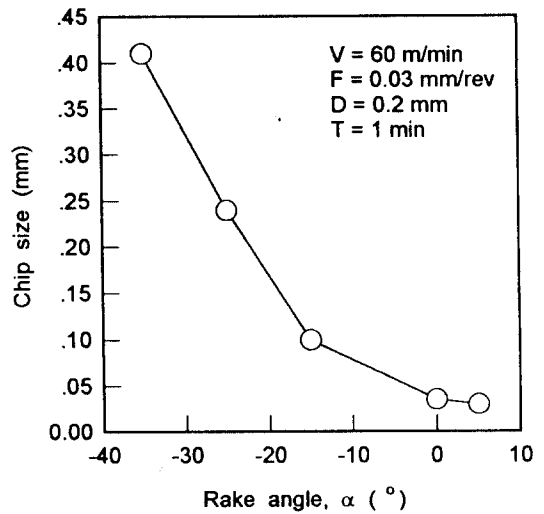


Fig. 6 Effect of the rake angle of CBN tool on chip size in turning

모가 크게 되어 공구 여유면과 피삭재와의 접촉이 적어지고 또한 절삭칩의 배출성이 양호해지게 되기 때문으로 사료된다. 그러나, 파괴규모가 커짐에 따라 표면거칠기는 커지게 되므로, Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 공구의 경사각이 -방향으로 커짐에 따라 표면거칠기가 현저히 증대된 것으로 생각된다. 한편 경사각이 -25° 보다 작아지는 경우는 절삭칩의 크기가 절삭깊이 보다 커지게 되는데 이것은 절삭시의 크랙 생성방향이 절삭깊이 지점 보다 아래로 향하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 초경공구의 노우즈 반경을 0.8, 2.0(사각형공구) 및 5 mm(원형공구)로 달리한 경우의 이송속도와 공구마모와의 관계를 보여준다. 이송속도가 커질수록 공구마모가 현저히 작아지고 있으며 노우즈 반경이 0.8 mm인 공구에 비해 2.0 mm인 공구의 경우가 마모가 크게 되어 있다. 또한 Fig. 8은 초경공구의 노우즈 반경을 0.8, 2.0(사각형공구) 및 5 mm(원형공구)로 달리한 경우의, 이송속도와 표면거칠기와의 관계를 보여준다. 원형공구는, 이송속도가 0.1 mm/rev 이상에서는 절삭면에 박리가 나타나고 각형공구에 비해 표면거칠기가 현저히 커지게 된다. 그러나 공구의 노우즈 반경이 작을 수록 이송속도가 커짐에 따른 표면거칠기의 증대는 완만함을 보여준다. 한편 Fig. 9에는 초경공구의 노우즈 반경을 0.8, 2.0(사각형공구) 및 5 mm(원형공구)로 달리한 경우의 이송속도와 절삭칩 크기와와의 관계를 보여준다. 이송속도 및 노우즈 반경이 증대될수록 절삭칩의 크기가 현저히 증대됨을 알 수 있는데 이 현상은 이송속도 및 노우즈 반경이 증대될수록 절삭시에 피삭재의 파괴규모가 증대되기 때문으로 사료된다. 따라서 Fig. 8에서 이송속도 및 노우즈 반경이 커질 수록 표면거칠기가 커지게 된 것은 파괴규모의 증대에 의한 것으로 생각된다. 또한 파괴규모가 커지면 공구여유면과 피삭재와의 접촉이 작아지고, 절삭칩이 커질수록 절삭칩의 배출성이 좋아지며 공구여유면으로 침입하기 어렵기 때문에 Fig. 7에서와 같이 이송속도 및 노우즈 반경이 커질수록 공구마모가 작아지는 것으로 생각된다. 단 R=5.0의 원형공구에서는 공구여유면과 피삭재와의 접촉면적이 넓어서 절삭칩이 커짐에 따른 배출성의 향상 효과가 적게 나타나기 때문에 R=2.0의 각형공구에 비해 그다지 공구마모가 작아지지 않은 것으로 사료된다.

Fig. 10은 절삭되는 면적 AD와 비절삭저항($F_s = F/AD$)

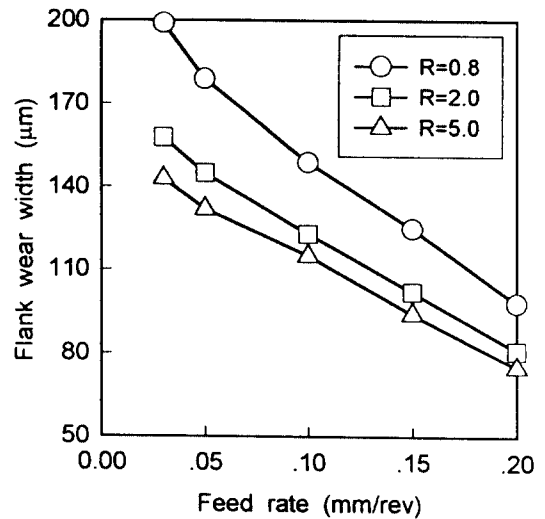


Fig. 7 Effect of feed rate and nose radius of tungsten carbide tools on flank wear width in turning.

$V=60\text{m/min}$, $D=0.2\text{mm}$, Cutting length=1000m

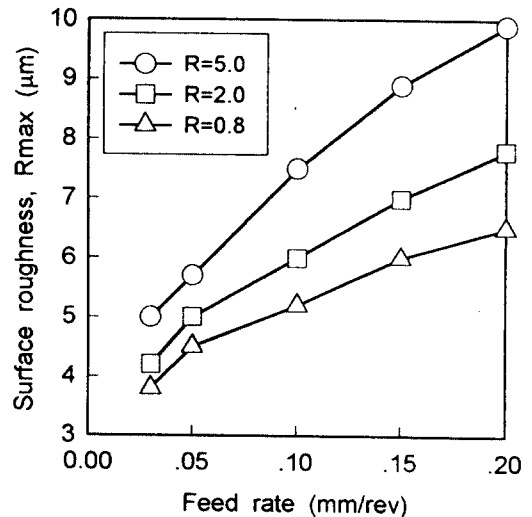


Fig. 8 Effect of feed rate and nose radius of tungsten carbide tools on surface roughness in turning

$V=60\text{m/min}$, $D=0.2\text{mm}$, $T=1\text{min}$

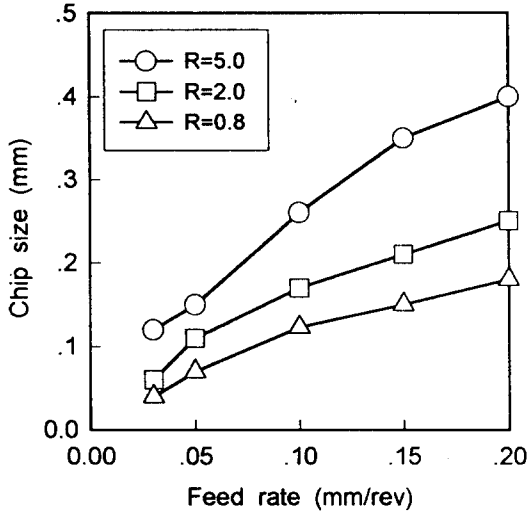


Fig. 9 Effect of feed rate and nose radius of tungsten carbide tools on chip size in turning
 $V=60\text{m/min}$, $D=0.2\text{mm}$, $T=1\text{min}$

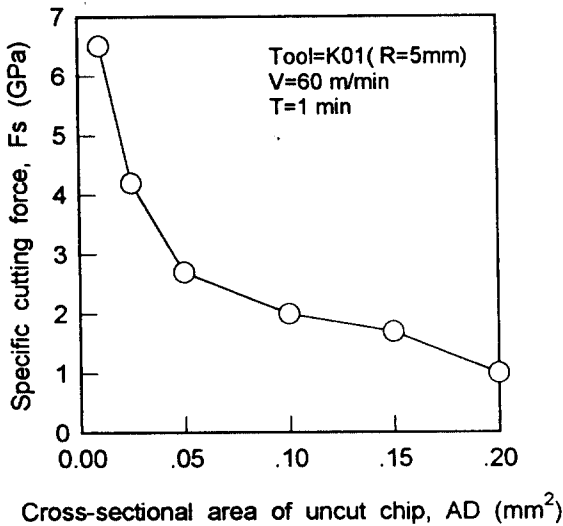


Fig. 10 Relation between cross-sectional area of uncut chip and specific cutting force in turning

의 관계를 보여준다. 비절삭저항은 절삭되는 면적이 작게 되면 극히 크게 되는 경향이 있다. 이 경향은 강의 절삭에 있어서도 치수효과의 관계에 의해 일어나는 것이 알려져 있지만 탄소 소결체의 경우는 큰 절삭면적에 있어서도 이 경향이 나타나는 특징을 가진다. 이것은 탄소 소결체의 절삭은 소성 변형이 아닌 취성파괴에 의해 일어나는 것이므로, 절삭칩(분체)의 크기에 파괴에너지가 영향을 미치기 때문이라 생각되어 진다.

3.2 드릴링 실험

Fig. 11은 드릴링시의 절삭속도와 스크스트 저항과의 관계를 보여 준다. 절삭저항은 1회째, 8회째, 16회째의 드릴링시에 측정하여 평균값을 취하였다. 절삭속도와 절삭저항과의 관계는 이송속도가 0.3mm/rev인 경우 절삭속도가 40m/min 까지는 절삭속도의 증가에 따라 스크스트 저항이 크게 증대되고 있지만, 50m/min의 절삭속도에서는 절삭속도가 40m/min의 경우와 유사한 값을 보여 준다. 그러나 낮은 이송속도에서는 절삭속도의 상승에 따른 절삭저항의 증대 경향이 약해지게 된다. 또한 이송속도가 0.1, 0.2, 0.3mm/rev로 커짐에 따라 스크스트 저항이 현저히 증대됨을 알 수 있다.

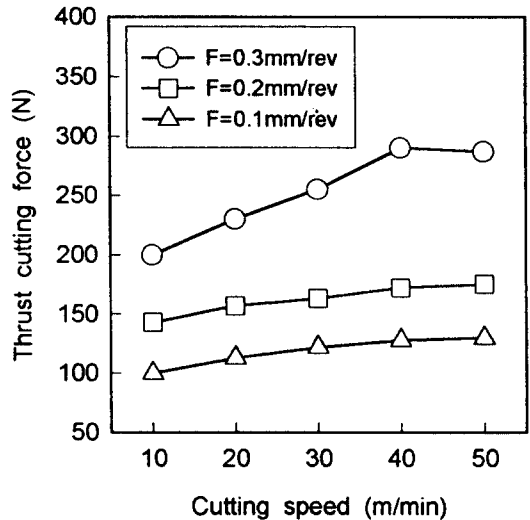


Fig. 11 Effect of cutting speed on cutting force in drilling

Fig. 12는 각 절삭속도에서 12개의 구멍을 가공한 후의 드릴의 여유면 마모폭을 나타낸 것으로서 마모폭은 드릴의 중앙부에서 측정된 것이다. 동일한 절삭속도에서는 이송속도가 큰 경우가 여유면 마모가 작아지게 되며, 20m/min 이하의 낮은 절삭속도에서는 드릴마모에 대한 이송속도의 영향이 현저히 작아지게 된다. 한편 절삭속도와 여유면 마모폭과의 관계를 보면, 모든 이송속도에서 절삭속도가 증가함에 따라 여유면 마모폭은 거의 직선적으로 증가한다. 이송속도 0.1mm/rev의 경우는 절삭속도 30m/min 이하에서는 절삭속도의 증가에 따라 여유면 마모폭이 급격히 증대하나, 절삭속도 30m/min 이상에서는 고속으로 될수록 여유면 마모폭의 증가는 완만함을 보여준다. 따라서, 가공능률과 공구수명의 관점에서 본다면 고속, 고이송속도에서의 절삭이 유리하다는 것을 나타낸다.

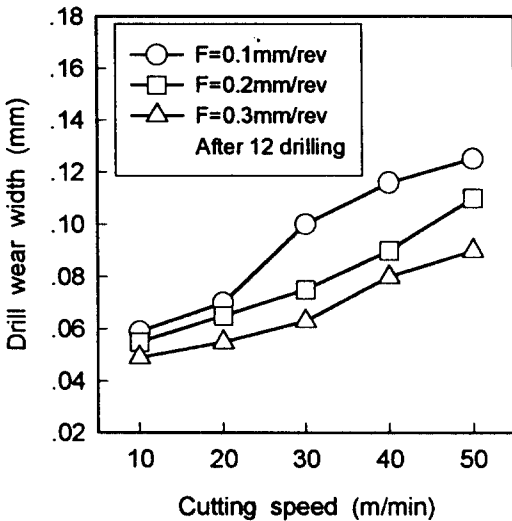


Fig. 12 Effect of cutting speed on drill wear

Fig. 13은 절삭속도와 구멍 내면의 최대 표면거칠기와의 관계를 보여주는 것으로서 이송속도를 각각 0.1, 0.2, 0.3mm/rev으로 변화시킨 결과를 보여준다. 표면거칠기는 절삭속도가 변화하더라도 그다지 변화되지 않고 또한 이송속도가 변화하더라도 큰 변화를 보여주지 않으며 표면거칠기의 차는 3 μ m 이내이다. 즉 최대 표면거칠기는 본 실험의 절삭조건 범위에서는 절삭속도와 이

송속도에는 그다지 의존하지 않는 것으로 되며 약 37 μ m으로 거의 일정하게 유지된다고 할 수 있다.

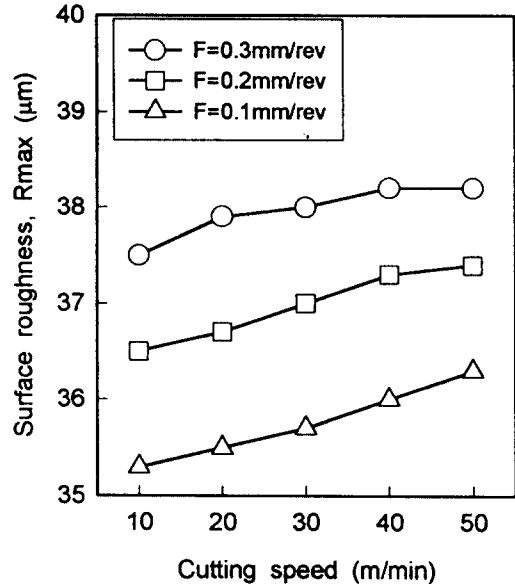


Fig. 13 Effect of cutting speed on internal surface roughness of drilled hole

Fig. 14는 절삭속도와 구멍 확대량의 관계를 나타낸 것으로서 구멍의 확대량은 각 가공조건에서 1회째, 6회째, 12회째 가공한 구멍을 측정하고 그 평균을 구한 것이다.

확대량과 절삭속도의 관계는 절삭속도가 크게 됨에 따라 확대량도 크게 된다. 또한 구멍 확대량과 이송속도와의 관계는 절삭속도가 낮은 경우에는 이송속도의 증가에 따라 구멍 확대량도 크게 되지만 절삭속도가 크질수록 구멍의 확대량에 미치는 이송속도의 영향은 작아지게 된다.

이러한 현상은 절삭속도 및 이송속도가 큰 경우가 절삭동력이 크다는 것에 관계된다고 사료된다.

4. 결 론

탄소 소결체에 대하여 선삭 및 드릴링 실험을 행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 선삭

참고문헌

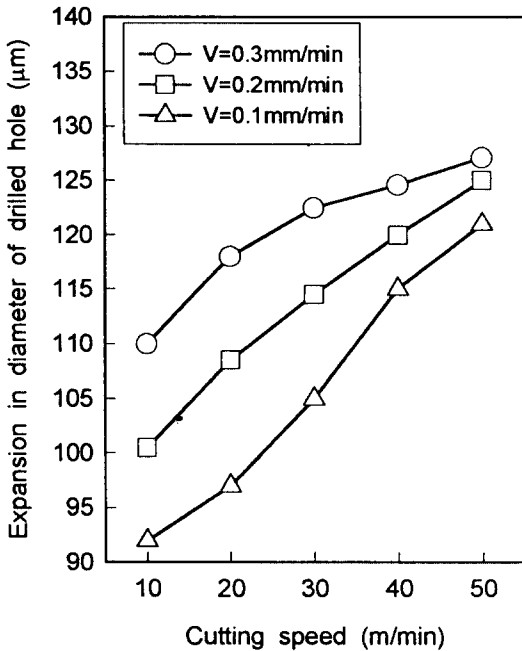


Fig. 14 Effect of cutting speed on the expansion of drilled hol

- 1) 표면거칠기는 공구 경사각이 + 방향으로 클수록 양호하고 공구마모 진행속도는 공구 경사각이 -방향으로 클수록 낮아지게 된다.
 - 2) 공구의 노우즈 반경을 크게 할 수록 절삭시 피삭재의 파괴규모가 커지게 되어 절삭면의 최대 표면거칠기는 현저히 증대된다.
 - 3) 초경공구 및 세라믹공구는 마모진행속도가 현저히 빠르며 CBN 및 소결다이아몬드공구는 우수한 성능을 발휘한다.
- (2) 드릴링
- 1) 가공능률과 공구수명 양자의 관점에서, 절삭속도가 높고 이송속도가 큰 절삭조건이 유리하다.
 - 2) 이송속도가 클수록 공구마모는 작아지게 되며 이러한 이송속도의 영향은 30m/min 이상의 절삭속도에서 현저히 나타난다.

- (1) B. T. Kelly, "Physics of Graphite", Applied Science Publishers, London, pp. 254~298, 1981.
- (2) M. Inagaki, 1984, "Fundamentals of Carbon Materials", Carbon Society of Japan, pp. 132~142, 1984.
- (3) M. Masuda, Y. Kuroshima and Yoshiteru Chujo, "Failure of tungstencarbide-cobalt alloy tools in machining of carbon materials", Wear, 169, pp. 135~140, 1993.
- (4) M. Masuda, Y. Kuroshima and Yoshiteru Chujo, "The machinability of sintered carbons based on the correlation between tool wear rate and physical and mechanical properties", Wear, 195 pp. 178-185, 1996.
- (5) 田中武司, 井川直哉, 黒島泰辛, 岩田弘, 眞鍋貞弘, "高硬度炭素焼結體の切削に關する研究", 精密工學會誌, Vol. 54, No. 9, pp. 1709-1714, 1988.
- (6) 黒島泰辛, 岩田弘, 眞鍋貞弘, "炭素焼結體の被削性(第1報)-工具壽命と工具摩耗の特性-", 精密工學會誌, Vol. 53, No. 12, pp. 1924-1930, 1987.
- (7) 黒島泰辛, 岩田弘, 眞鍋貞弘, "炭素焼結體の被削性(第2報)-切りくず生成機構と工具壽命-", 精密工學會誌, Vol. 54, No. 12, pp. 2313-2318, 1988.
- (8) 黒島泰辛, 岩田弘, 眞鍋貞弘, "炭素焼結體の被削性(第3報)-工具損傷に及ぼす黒鉛化溫度-", 精密工學會誌, Vol. 59, No. 9, pp. 2313-2318, 1993.
- (9) 黒島泰辛, 岩田弘, 眞鍋貞弘, "炭素焼結體の被削性(第4報)-セラミック工具の切削性能と摩耗特性-", 精密工學會誌, Vol. 62, No. 3, pp. 463-467, 1996.
- (10) 布施久康, "CBN工具摩耗機構", 昭和1986年精密工學會春季大會學術講演會講演論文集, pp.733-734, 1986.
- (11) 竹山秀彦, "黒鉛の切削における工具摩耗とその速度特性", 日本機械學會論文集, Vol. 31, No. 225, pp. 834-839, 1965.