

파인 세라믹스의 초음파 진동절삭에 관한 연구

강종표*, 송지복*

A Study on the Ultrasonic Vibration Cutting Properties of Fine Ceramics

Jong-Pyo Kang*, Ji-Bok Song**

ABSTRACT

Conventional Cutting(CC) and Ultrasonic Vibration Cutting(UVC) of 20(KHz) are practised with standard lathe for fine ceramics(Al_2O_3). UVC is suggested to good cutting method for difficult-to-machine-materials and it is known to excellent cutting method to super precision cutting and elevation of productibility for general, nonferrous metals. In this research, main results to be obtained are as follows: 1. From the CC and UVC results by general lathe with sintering diamond tool, the surface roughness and roundness are improved in UVC. Also tool life is longer in UVC than CC. From the observation of machined surface, it is found that brittle fractural material remove occurred in fine ceramics cutting. 2. It is verified that the thrust force is the biggest in fine ceramics cutting, principal force is the next, and feed rate force the third and it is appear a little, on the other hand the principal force is the biggest in metal cutting, feed rate force is the second, and thrust force is the next.

Key Words : Conventional Cutting (상용절삭), Ultrasonic Vibration Cutting (초음파진동절삭), Fine Ceramics Cutting (파인세라믹스절삭), Sintering Diamond Tool (소결다이아몬드 공구)

1. 서 론

파인 세라믹스는 내마모성, 내열성, 내식성, 절연성 등 기계적 성질이 뛰어나 기계 부품 소재로서 각광을 받고 있으나, 소결 성형시 25~30%의 수축률 때문에 정밀 가공을 요하게 된다. 이때 취성 파괴적인 재료 제거가¹⁾²⁾ 일어나 가공면은 거칠어지고 공구는 극심한 마모로 인하여 수명이 짧아진다.³⁾

때문에 종래의 절삭방식으로는 가공정도와 가공능률을 기대하기 어려워 이에 대처할 새로운 가공방식으로서

초음파 진동절삭이 강력하게 대두되고 있다.

Kumabe⁴⁾ 등은 진동절삭으로 주철재를 진원도 0.25(μm), 표면조도 0.1(μm) 정도의 정밀도를 얻은 바 있고, Unno⁵⁾ 등은 파인 세라믹스에 초음파 진동연삭을 실시하여 상용연삭가공보다 우수함을 보여 주었다.

본 연구에서는 알루미늄 파인 세라믹스(Al_2O_3)를 대상으로 초음파 진동절삭을 행하여, 가공면의 거칠기, 칩의 형상, 진원도, 절삭력, 공구마모 등을 종래의 상용절삭 방식과 비교 검토, 파인 세라믹스의 진동절삭에 따른 특성을 규명코자 하였다.

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 정밀기계과 (정회원)

2. 진동절삭의 기구학적 조건

Fig.1은 절인의 운동과 절삭 저항과의 관계를 도시한 것이다.

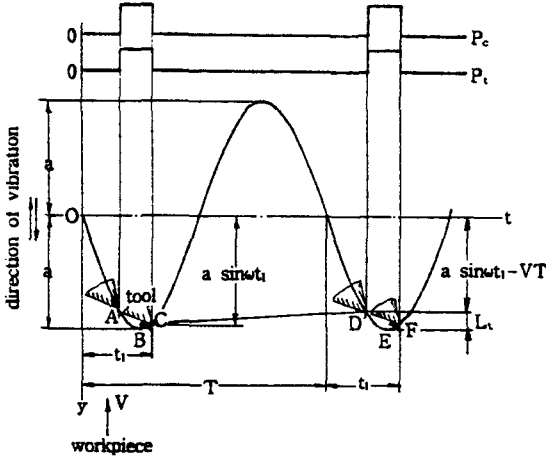


Fig.1 Mechanism of vibration cutting

바이트가 A점에서 절삭속도 V인 피삭재와 접촉을 개시하여 B점을 거쳐 C점에 이르는 동안에 펄스형의 충격력을 작용시켜 칩을 생성하고, C점에서부터 D점까지는 바이트와 공작물이 분리되어 절삭력은 작용하지 않는다. 이와 같은 운동을 D점에서 다시 반복하므로서 계속적인 절삭이 이루어지고, 이때 바이트의 변위와 속도는 각각

$$y = a \sin \omega t \quad (1)$$

$$\dot{y} = a\omega \cos \omega t$$

이 되므로 바이트가 피삭재로부터 분리되는 속도가 $a\omega$ 의 값보다 크면 상용절삭(CC)이 된다. 따라서 진동절삭(UVC)이 이루어질 수 있는 한계 절삭속도는 다음과 같다.

$$V_c = a\omega = 2\pi a f \quad (2)$$

한편, 바이트와 공작물이 분리되는 C점에서 바이트의 변위는 $a \sin \omega t_1$ 이고, 이 이후로 임의의 시간(t) 동안 공작물의 변위는

$$\dot{y} = a \sin \omega t_1 - V(t - t_1) \quad (3)$$

이 되기 때문에 바이트의 1주기 동안의 공작물이 절삭된 길이는

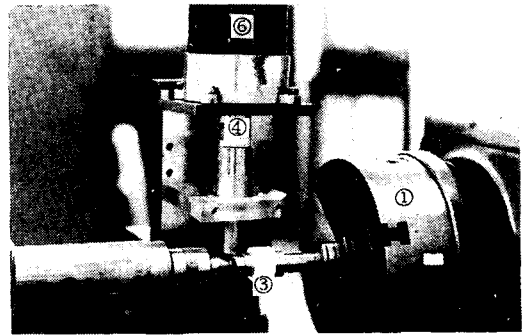
$$L_t = V/f \quad (4)$$

이 된다. 식(4)에서 알 수 있듯이 진동절삭의 절삭성을 좌우하는 L_t 는 피삭재의 절삭속도 V에 비례하고, 진동수 f에 반비례하므로 효과적인 절삭성을 얻기 위해서는 주파수가 높은 진동자를 이용해야 할 것이다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치⁶⁾

Fig.2에서와 같이 WHACHEN WL-435 범용선반의 주축과 이송축에 SINRA DC 제어구동모터 시스템을 연결하여 절삭속도와 이송속도를 무단으로 변속할 수 있도록 하였으며, 진동의 증폭을 위한 부스터와 다이아몬드 바이트가 부착된 step형 공구 혼(Fig.3)을 자체 설계 제작하여, 20(KHz)의 주파수를 가진 진동자에 고착시킨 초음파 진동 장치를 선반의 왕복대에 장착하였다.



① spindle ② tool horn ③ workpiece
④ booster ⑤ fixture ⑥ transducer

Fig.2 Photograph of experimental apparatus

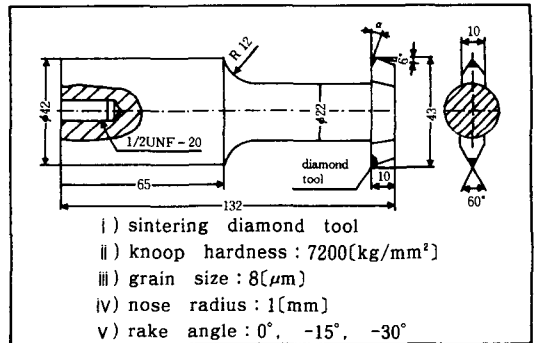
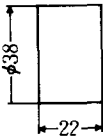


Fig.3 Shape of tool horn and figure of diamond tool

3.2 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 알루미늄 파인 세라믹스 (Al_2O_3)로 그 크기와 기계적 성질은 Table 1과 같다. 시험편의 파단면 Fig. 4(a)와 이를 다이아몬드 파우더로 폴리싱한 후 thermal etching해서 SEM 촬영하여 나타낸 것이 Fig. 4(b)이다. 그림에서와 같이 시험편은 수 마이크로에서 수십 마이크로의 크기를 가진 입자와 기공으로 형성되어 있음을 알 수 있다.

Table 1 Mechanical properties of workpiece

Figure	Properties		
	Bending strength	300	[MPa]
	Compression strength	1000	[MPa]
	Hardness(HrC)	85~87	
	Density	3.60~3.65	[g/cm ³]
	Sintering temperature	1650	[°C]
	Water absorption	0	[%]
	Fracture toughness K _{IC}	4.1	[MPa√m]
	Elastic modulus	370	[GPa]
	Yield strength	6000	[MPa]

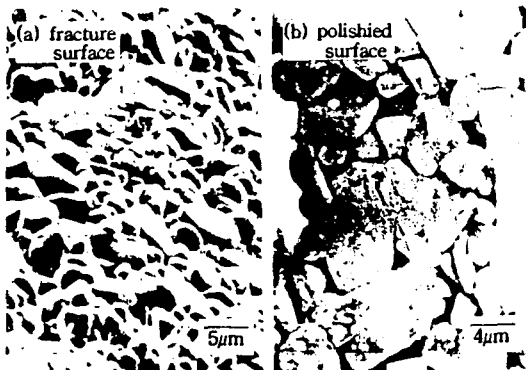


Fig. 4 SEM micro structure of ceramics
(a) fracture surface
(a) polished surface

3.3 실험조건 및 방법

Table 2는 실험에 적용된 절삭조건을 표시한 것이다.

Table 2 Cutting condition

Frequency	[KHz]	20
Amplitude	[µm]	20~30
Cutting speed	[m/min]	20~50
Feed rate	[mm/rev]	0.03~0.1
Depth of cut	[mm]	0.01~0.1
Cutting fluid	—	Soluble oil

실험용으로 제작된 시험편을 고정용 치구에 장착하여 선반의 척에 고정시킨 후 매조건마다 타코메타로 회전수를 측정, 절삭조건에 따른 오차를 가능한 한 줄이도록 하였다. 시험편은 소결시 변형되어 있기 때문에 최초의 진원이 형성되도록 하고, 또 위의 절삭조건에 따라 실험하였을 때 앞 가공의 영향을 줄이기 위해 진동 절삭으로 예비 가공하였다. 가공된 표면과 칩의 SEM촬영은 Akashi Beam Tech.의 ABT 130-C를 활용하였으며, 가공면의 거칠기와 진원도 측정은 Taylor-Hobson의 Tayround 200과 Tayround 4를 각각 이용하였다.

4. 실험 결과 고찰

4.1 가공표면과 거칠기

절삭가공중 파인 세라믹스의 표면에 남겨진 크랙은 제품의 질에 현저한 영향을 미치게 된다. Fig. 5와 Fig. 6은 동일한 가공조건 하에서 진동 및 상용절삭하였을 때, 건·습식절삭에 대한 표면형상을 주사 현미경으로 500배 확대하여 나타낸 것이다. 표면전체가 한결같지 않고 금속절삭에서 나타나는 것과 같은 가공 흔적과 세라믹스 입자가 떨어진것 같은 흔적이 동시에 나타나고 있으나, 진동절삭이 상용절삭보다 전단소성변형에 의한 재료제거 가공으로 생성된 면이 많이 나타나고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 절삭깊이 0.01(mm), 이송속도 0.03(mm/rev), 절삭속도 20~50(m/min)에서 공구 경사각을 0°, -15°, -30°로 변화시키면서 건·습식 절삭하였을 때의 가공면의 거칠기를 도시한 것이다. 건·습식 절삭에 관계없이 절삭속도가 증가함에 따라 가공면은 거칠어 지고 있다.

이는 금속절삭인 경우 전단소성변형에 의하여 칩이 형성되기 때문에 절삭속도의 증가와 유제의 공급에 따라 가공면은 양호한 결과를 가져오나, 고 경도 취성재료인 파인 세라믹스의 절삭에 있어서는 취성 파괴적인 재료제

거가 일어나기 때문에 절삭속도가 증가하면 이에 비례하여 계속되는 충격 에너지가 커져 입자가 떨어질 가능성이 높아 가공면이 악화되는 것으로 여겨진다. 또한 유체의 공급은 온도상승에 따른 세라믹스의 연화 작용을 억제하여 소성변형적 재료제거가 일어나기 어렵게 하기 때문에 가공면에 영향을 미치지 않는 것이라 생각한다. 공구 경사각의 영향은 -30° 에 비하여 -15° 일때가 건삭식을 막론하고 가공면의 거칠기가 좋았다. 공구 경사각이 증가하면, 배분력의 증가 비율이 커 그 합성 저항치의 방향이 보다 아래쪽으로 향하기 때문에 취성 파괴적인 재료제거가 어려워진다. 반면 -15° 이하에서 공구 경사각이 0° 로 접근함에 따라 치평현상이 발생되어 오히려 가공면은 거칠어지고 있었다.

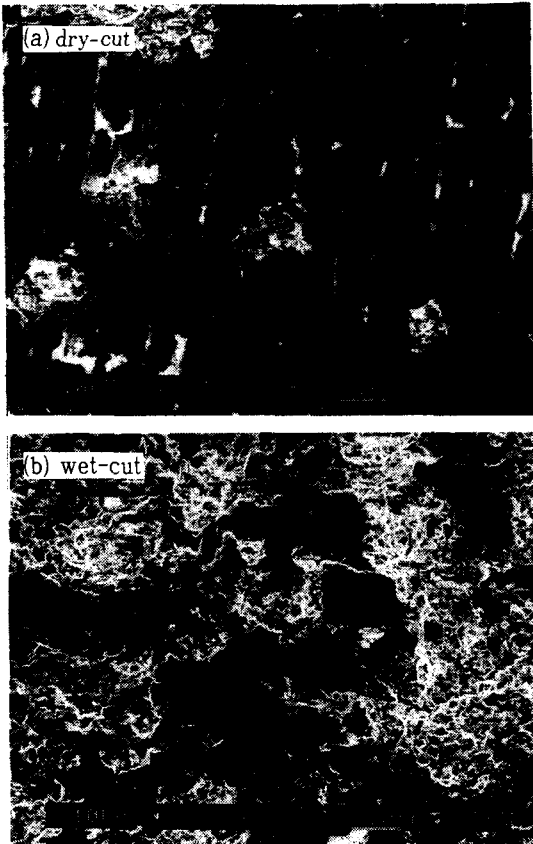


Fig.5 SEM Photo of machined surface for vibration cutting
cutting speed : 20(m/min), feed rate : 0.03 (mm/rev) depth of cut : 0.01(mm), rake angle : -15°

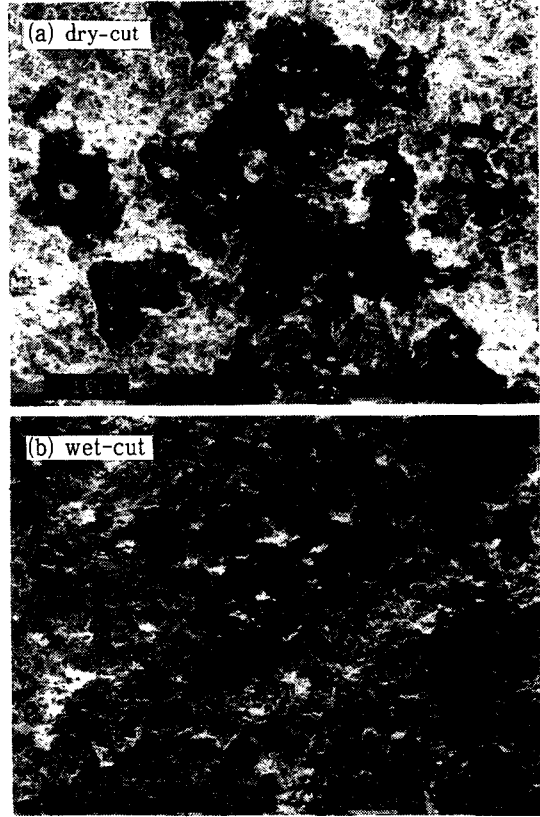


Fig.6 SEM Photo of machined surface for conventional cutting
cutting speed : 20(m/min), feed rate : 0.03 (mm/rev) depth of cut : 0.01(mm), rake angle : -15°

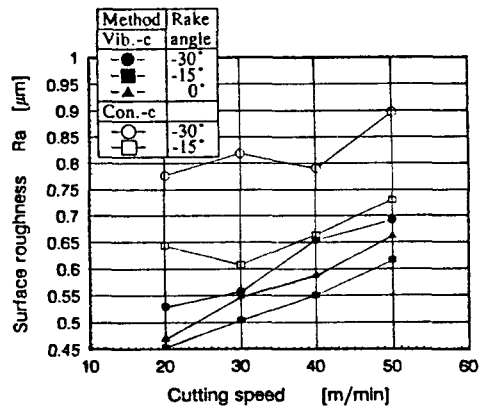


Fig.7 Relationship between cutting speed and surface roughness for vibration and convention cutting (Dry-cut)
depth of cut: 0.01(mm), feed rate: 0.03(mm/rev)

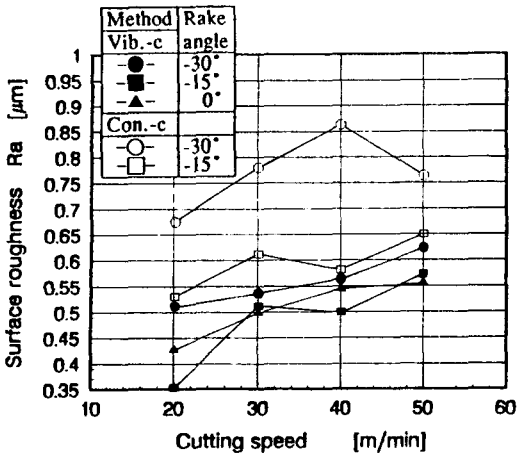


Fig. 8 Relationship between cutting speed and surface roughness for vibration and conventional cutting (Wet-cut)
depth of cut : 0.01(mm), feed rate : 0.03 [mm/rev]

이송속도가 가공면의 거칠기에 미치는 영향을 표시한 것이 Fig. 9 및 Fig. 10이며 Fig. 11은 절삭깊이를 변화시켰을 때의 가공면의 거칠기이다. 대체로 절삭속도를 변화시킨 경우와 같은 경향을 나타내 주고 있으며, 진동절삭이 상용절삭보다 양호한 값을 나타내고 있다.

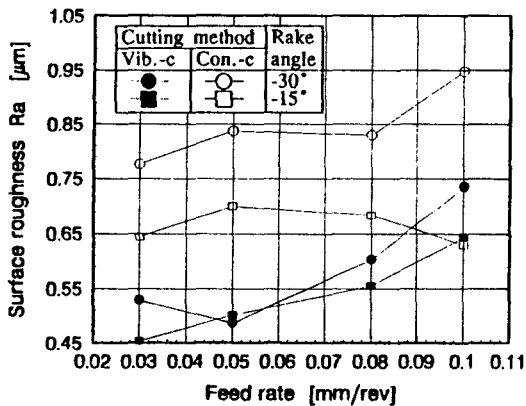


Fig. 9 Relationship between feed rate and surface roughness for vibration and conventional cutting (Dry-cut)
cutting speed : 20(m/min), depth of cut : 0.01(mm)

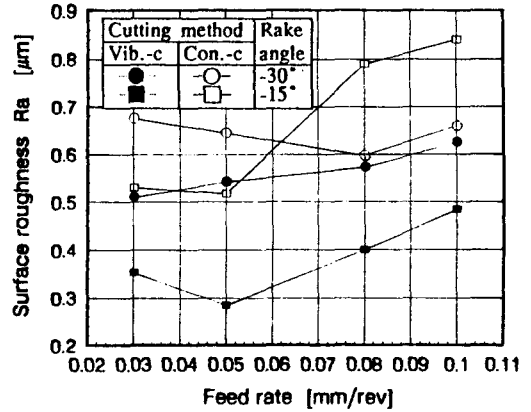


Fig. 10 Relationship between feed rate and surface roughness for vibration and conventional cutting (Wet-cut)
cutting speed : 20(m/min), depth of cut : 0.01(mm)

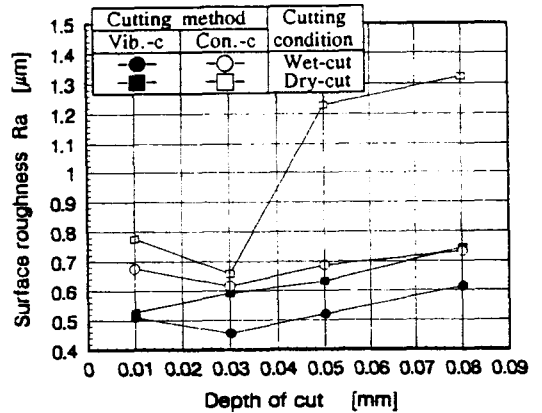


Fig. 11 Relationship between cutting depth and surface roughness for vibration and conventional cutting (Dry-cut)
cutting speed : 20(m/min), feed rate : 0.03 [mm/rev], rake angle : -30°

4.2 칩의 형상

Fig. 12는 금속과 세라믹스의 절삭에서 생성되는 칩의 형상을 단순화시켜 나타낸 것이다. 금속절삭에서는 전단 소성변형에 의해 칩이 연속되어 배출되지만, 세라믹스의 경우는 취성 재료의 절삭에서 생성되는 전형적인 균열형 칩이 생성된다.

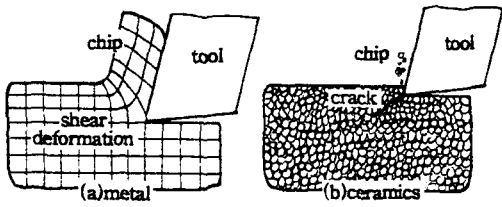


Fig. 12 Cutting mechanism for metal and ceramics

Fig. 13과 Fig. 14는 각각 진동절삭과 상용절삭하였을 경우, 생성된 칩을 2500배로 확대하여 건·습식 절삭을 비교하여 나타낸 것이다. 전반적으로, 칩의 크기는 상용절삭에 비해 진동절삭쪽이 미소함을 보여주고 있다.

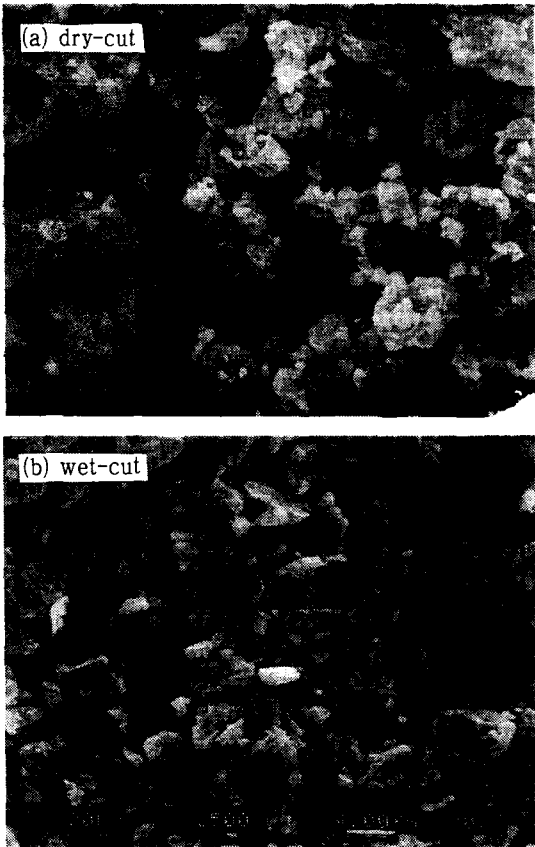


Fig. 13 SEM Photo of chip configuration for vibration cutting
cutting speed : 20(m/min), feed rate : 0.03 (mm/rev) depth of cut : 0.01(mm), rake angle : -30°

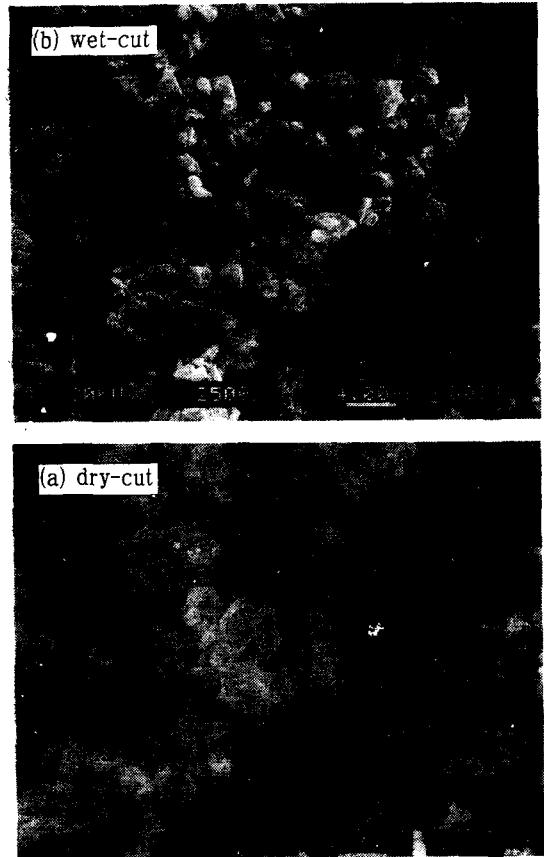


Fig. 14 SEM Photo of chip configuration for conventional cutting
cutting speed : 20(m/min), feed rate : 0.03 (mm/rev) depth of cut : 0.01(mm), rake angle : -30°

Fig. 15는 일정한 절삭속도하에서 이송속도를 변화 시키면서 상용절삭 하였을 때 절삭력의 변화를 나타낸 것이다. 금속절삭에 비해 배분력이 두드러지게 큰것은 인장강도에 비하여 압축강도가 훨씬 크게 나타나는 세라믹스의 특성과 공구 경사각의 negative화에 의한 것으로 가공면과 진원도에 많은 영향을 미칠것으로 여겨진다.

일반적으로 배분력의 증가는 합성절삭력 방향의 하향성 때문에 가공면은 거칠어지고, 진원도는 악화되는 경향을 보여준다.

Fig. 16에는 절삭속도를 변화시켜 진동 및 상용절삭한 경우의 진원도 값을 나타내었다. 진동절삭이 상용절삭에 비하여 양호한 값을 나타내고 있다. 이것은 진원도에

가장 큰 영향을 미치는 배분력방향의 변위가 계속적인 저항력이 작용하는 상용절삭에 비해 진동절삭에서는 공구와 공작물의 순간적인 분리로 절삭될 때 생겼던 배분력방향의 변위가 복원되고, 또 충격력에 의한 순간적인 절삭으로 그 방향으로의 변위를 미소하게 생성시키면서 절삭되기 때문이다 생각된다.

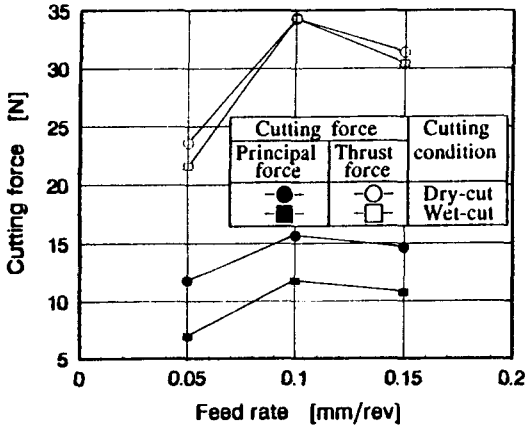


Fig. 15 Feed rate versus cutting force for conventional cutting
cutting speed : 30(m/min), depth of cut : 0.02(mm)

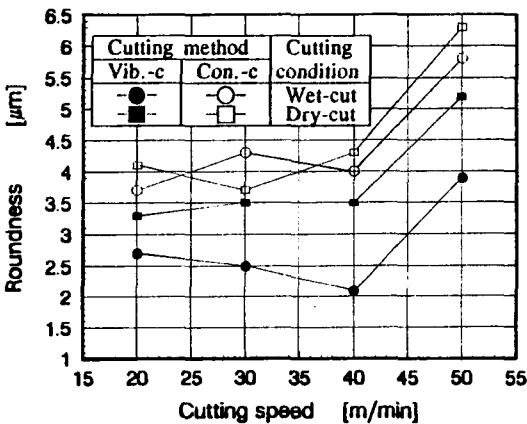


Fig. 16 Relationship between cutting speed and roundness for vibration and conventional cutting
depth of cut : 0.01(mm), feed rate 0.03 (mm/rev), rake angle : -30°

Fig. 17은 실제로 측정된 진원도의 형상을 비교하여 나타낸 것으로, 위에서 기술한 이유로 진동절삭쪽이 보다 양호한 값을 나타내고 있다.

4.4 공구마모

Fig. 18에 진동절삭 및 상용절삭하였을 때, 절삭시간에 따른 공구의 플랭크마모 진행곡선을 나타내었다. 여기서 상용절삭시 절삭속도 50(m/min)에서 플랭크면이 0.2(mm)마모되기까지 불과 약 20분, 30(m/min)에서 0.2(mm)까지 마모되는데 약 30분 정도로 급속한 공구마모를 나타내고 있다. 이에 반하여 진동절삭에서는 0.2(mm)의 플랭크마모에 절삭속도 50(m/min)에서 약 40분, 30(m/min)에서 약 45분에서 나타나므로, 상용절삭보다 긴 공구수명을 나타낸다.

한편, 크레이터 마모(crater wear)는 거의 생기지 않았는데, 그 이유는 Fig. 19의 실제 절삭력파형을 나타낸 것처럼 습식과 건식모두에서 배분력은 변화가 거의 없지만, 주분력은 약 반 정도로 습식절삭에서 감소하고 있다. 한편 이송분력은 절삭조건에 관계없이 아주 미소한 값이었다.

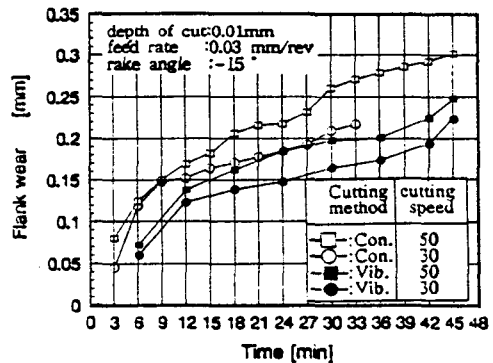


Fig. 18 Comparison of tool wear between vibration cutting and conventional cutting

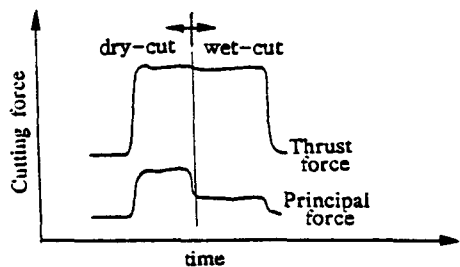


Fig. 19 Cutting force signal in oscilloscope

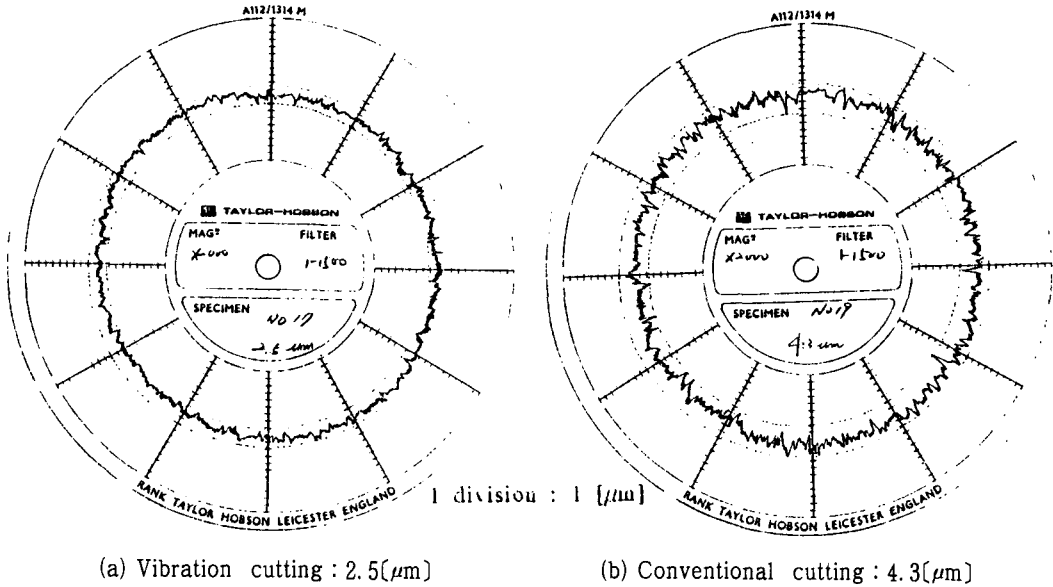


Fig. 17 Comparison of roundedness between vibration and convention cutting (Wet-cut)
cutting speed : 30(m/min), depth of cut : 0.01(mm), feed rate 0.03(mm/rec), rake angle : -30°

5. 결 론

- 알루미나 파인 세라믹스를 진동절삭하여 상용삭과 비교 검토한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.
- 1) 초음파 진동절삭인 경우 어떠한 가공조건에서도 상용절삭보다 그 정도가 좋았으며 일반적인 금속의 경우와 달리 저속일수록 양호한 결과를 가져왔다.
 - 2) 파인 세라믹스는 절삭가공시 표면에 미소한 균열을 발생시키는 취성파괴적인 재료 제거로 칩이 생성되고 칩의 크기는 상용절삭에 비해 진동절삭쪽이 미소함을 나타내었다.
 - 3) 금속절삭에서는 공구 경사각을 크게 할수록 가공면이 양호하지만 파인 세라믹스의 절삭에서는 공구 경사각을 음의 각도로 하는 것이 양호한 값을 나타내었고, 그 경사각은 -15° 전후가 적절한 각도였다.
 - 4) 주분력에 비해 배분력이 크게 되므로 상용절삭에서는 진원도가 좋지 않았지만, 진동절삭을 이용하므로서 진원도를 양호하게 개선할 수 있었다.

참고문헌

1. 田中芳雄, 井戸 守, “セラミックスの機械加工における材料除去機構”, 機械と工具, pp. 33~43, 1988. 6.
2. 杉田忠彰, 上田完次, 橋本知明, “ファインセラミックスのマイクロ切削に関する破壊力學的研究”, 精密工學會誌, Vol. 51, No. 10, pp. 1940~1945, 1985.
3. セラミックス加工研究會 編, “ファインセラミックスの精密加工”, 工業調査會, pp. 3~6, 1990.
4. 長部淳 一郎, “精密加工振動切削 (基礎と應用)”, 實教株式會社, 第1章, 1979.
5. 海野邦昭, 皆川 明, 西村一仁, “ファインセラミックスの超音波研削特性”, 日本職業訓練大學校紀要, 第18號 A編, pp. 49~60, 1989.
6. 강종표, 김병화, 송지복, “초음파 진동절삭에 의한 가공정도 향상에 관한 연구”, 韓國精密工學會誌, 第8卷, 第2號, pp. 69~77, 1991.