604 大韓機械學會論文集 第13卷 第4號, pp. 604~610, 1989.

〈論 文〉

파인 세라믹(Al_2O_3)의 被削性에 관한 硏究

金 聖 謙*·李 用 成**

(1989년 2월 13일 접수)

A Study on the Machinability of Fine Ceramics (Al_2O_3)

Seung Kyum Kim and Young Seung Lee

Key Words: Sintered Diamond Tool(소결 다이아몬드 공구), Thrust Force(배분력), Initial Wear(초기 마멸), Abrasive Wear(아브레시브 마멸), Surface Roughness(표면 거칠기), Plastic Deformation(소성 변형), Cutting Mechanism(절삭 기구)

Abstract

This paper is concerned with the machinability of fine ceramics (Al_2O_3) by using sintered diamond tools. For this purpose, ceramics cutting experiments under various cutting conditions such as cutting speed, feed rate, and others were carried out. The main results are as follows: (1) During the cutting of fine ceramics, the used tools were found to be slightly chattering at cutting speed of 70m/min, and at cutting speed of higher than this I found the fine ceramics difficult to be cut. (2) When I used a tool with large nose radius, there occured a small amount of wear on the flank of the tool. However, at the early stage of fine ceramics cutting, the tools with smaller nose radii were required mainly to prevent the chipping of the ceramics. (3) When the materials were dry-cut, the appropriate cutting speed was found to be lower than 40m/min, and when the materials were dry-cut, I could cut them without any difficulty even at the speed of 70m/min, the surface roughness of ceramics cut at the speed of 70m/min was considerly fine. (4) It is generally believed that the principal cutting force is the largest in the case of steels cutting, but I found the thrust cutting force to be larger than any other cutting forces in the case of ceramics cutting.

1. 序 論

파인 세라믹 및 이에 준하는 脆性 材料는 고온강도, 耐蝕性, 耐熱性 및 耐磨滅性이 우수하여 기계요소로 개발하기 위해, 세라믹의 加工性에 관한 연구가 절실히 요청되고 있다. 세라믹 부품의 가공은 연삭에 의존하고 있으나, 앞으로 小量多品種 생산 시스템으로 전환하기 위해서는 절삭가공 방법이 유망하므로 이 분야에 관한 연구, 개발이 필요하다.

지금까지의 연구는 세라믹의 정밀 연삭 가공에 대해서 松井[1], 다이아몬드 砥石에 의한 세라믹의 연삭가공은 小[2] 등이 주로 연구했고, 절삭가공에 대해서는 파인 세라믹의 기계가공은 岡村外 2인[3], 머시인어블(machinable) 세라믹의 절삭가공은 德山 外 1인[4]과 세라믹 假燒材의 피삭성은 鳴瀧 外 3인[5]이 있다. 또 엔지니어링 세라믹의 기계가공은 富森[6]의 硏究가 있는 정도로 세라믹의 절삭가공은 아직 초기단계에 지나지 않는다.

본 연구는 알루미나계 세라믹의 燒結 다이아몬드 공구로 절삭시의 칩의 형태와 절삭저항을 관찰하였

*정회원, 천안공업전문대학 기계과
**정회원, 단국대학교 공과대학 기계공학과

다. 절삭 樣式은 건식과 습식으로 하고, 여러 가지 절삭조건에 따른 flank 마멸의 진행과정, 가공면의 표면거칠기에 미치는 영향 및 가공면의 크랙 상태를 走査型 顯微鏡으로 확대 검출하여 加工狀態를 정밀하게 조사, 측정하였다.

2. 實驗方法

2.1 시험재료

Fig. 1 (a), (b)는 알루미나 세라믹 시편 및 그 組織이며, 시편의 규격은 상압 소결하여, 40ϕ×100mm(Fig. 1)로 절단되어 공급된 것이며, 경도는 Hv2130이고, 이 피삭재의 純度는 알루미나 99.6%이다.

실험공구는 폐기형 소결 다이아몬드(sintered diamond : SD) 팁(이화 다이아몬드)으로 공구 홀더에 부착한 공구형상은 (0, 0, 5, 5, 5, 5, 0.8)이고, 필요에 따라 nose 반경을 0.2mm, 0.4mm로 사용하였으며, 다이아몬드의 경도는 Hv 5500 kg/mm², 耐磨滅性 계수는 220이다.

2.2 실험장치 및 실험방법

실험한 기계는 NC선반(PUMA 10)으로 주축의 回轉數 20~3150rpm, 주축의 최소 이송 단위 0.001mm이고, 驅動 모터의 동력은 15HP이다. 실험장치는 선반의 공구 홀더에 3차원 공구동력계(TSM-TH)를 연결하여 상용범위의 절삭저항을 측정했고, 낮은 절삭저항값을 고감도의 스트레인 게이지를 써서 정밀하게 측정하였다. 또, 가공된 피삭재의 표면거칠기(R_{max})는 표면조도계(SUP-COM-B)로 측정하였고, 피삭재의 加工表面 상태는 走査型 顯微鏡(SEM : LSL-DS-130)을 써서 組織 및 크랙 상태를 검사했다. 그리고 공구현미경에 의해 플랭크 磨滅量을 측정했으며, 공구마멸기준은 V_B=0.3mm(ISO 규정)로 하였다.

본 실험에 주로 적용한 절삭조건은 절삭속도 10~100m/min, 이송량 0.01~0.05mm/rev, 절삭깊이는 0.1~0.3mm이며, 절삭 양식은 乾式과 습식으로 절삭하여 실험하였다.

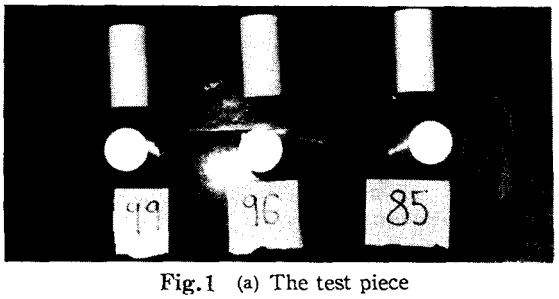


Fig. 1 (a) The test piece

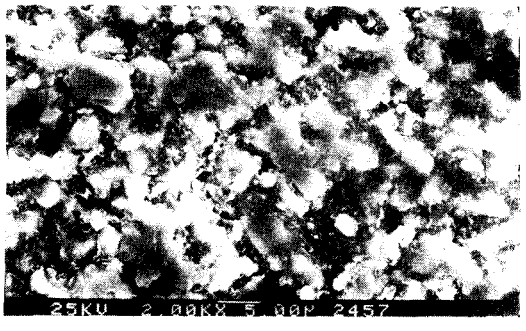


Fig. 1 (b) Structure texture of alumina ceramics

3. 實驗 및 考察

3.1 절삭상태

알루미나 세라믹의 절삭에서, 절삭속도를 낮추면 채터링(chattering)이 발생하기 쉬운 한계절삭깊이가 증가된다. Fig. 2는 절삭속도에 따른 채터링 한계 절삭깊이를 3종류의 이송량에 대해서 나타낸 것이다. 이 영역을 구분하면, 채터링이 없는 영역(Ⅰ), 遷移 領域(Ⅱ), 채터링 발생 영역(Ⅲ)이 되며, 절삭속도, 이송량, 절삭깊이에 따라 주로 결정되고 있다.

이와 같이, 고속절삭속도 영역일수록 채터링이 발생하는 한계절삭깊이가 감소하고, 채터링이 심하

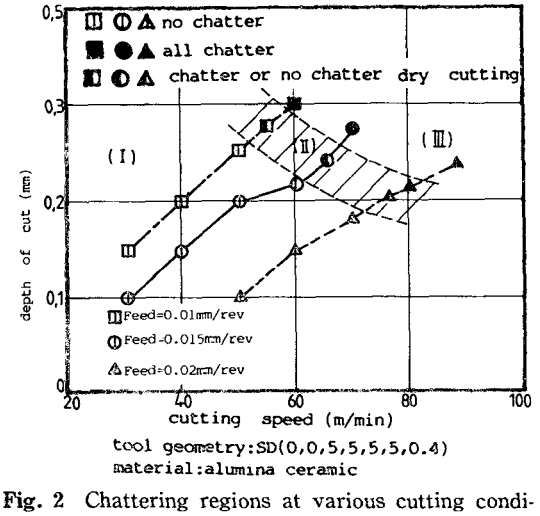
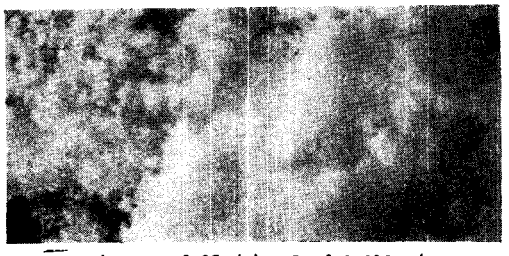


Fig. 2 Chattering regions at various cutting conditions



Cutting speed:25m/min Feed:0.012mm/rev
Depth of cut:0.1mm Dry cut

Fig. 3 The form of the ceramic chips

여, 절삭상태가 불안정하게 된다. 또, 절삭속도 80 m/min, 절삭깊이 0.21mm에서 배분력이 150N에 도달하여, 절삭기구에 채터링 현상의 발생과 아울러, 피삭재의 모서리가 칩핑되고 있다. 이러한 채터링이 발생되고 있는 원인은 難削材의 절삭과정에 있어서 공구와 피삭재 사이의 상대 振動을 일으키는 變動切削力, 즉 再生 채터의 inner modulation 성분중 허수부의 효과에 기인한다고 생각된다.

또, 채터링의 한 현상으로, 이송량이 0.02mm/rev, 0.01mm/rev로 작아질수록 채터링이 발생하기 쉽고, 限界절삭깊이도 증가하여 절삭기구가 불안정하게 된다.

그러나, 이 다이아몬드 공구로 한계절삭조건 이내에서 세라믹을 乾式절삭한다면, 피삭재의 모서리에 생기는 칩핑 현상과, 공구의 날끝에 나타나는, 채터링 現象이 상당히 억제될 수가 있다고 본다.

한편, 세라믹을 절삭할 경우, 강재의 칩형태와 달리 먼저 脆性破壞가 일어나서 칩이 배출되는 경우가 많고, 그 모양은 Fig. 3과 같으며, 적용된 절삭조건은 切削速度 25m/min, 이송량 0.012mm/rev, 절삭깊이 0.1mm이다.

여기서 배출된 알루미나 세라믹의 칩은 고온분말상으로 되어 있고, 엉켜있는 모양이 마치 구름처럼 보인다. 칩생성형태를 보면, 강재는 피삭재의 일부가 塑性變形하여, 유동형칩이 배출되는 경우가 많으나, 세라믹은 微少破壞와 연속적인 크랙으로 분말상 칩이 유출된다.

그리고, 대부분의 칩은 저속절삭속도 영역에서는 아래로 떨어지나, 절삭속도가 70m/min 이상 되면, 원심력에 의해서, 공작물과 함께 원통면 주위에 말려들어간 뒤에 점차 아래로 떨어진다.

3.2 공구마멸

燒結 다이아몬드 공구(SD)로 알루미나 세라믹(99.6%)를 습식(유화유)과 乾式으로 절삭하였을 때, 여러 가지 절삭조건에서 공구의 크레이터 마멸, 플랭크 마멸, 칩핑 현상 및 加工面의 상태를 비교하여 검토하였다.

(1) 습식 절삭

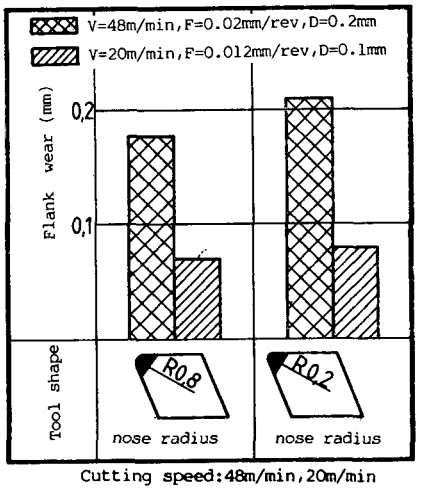
(가) Nose 半徑의 영향

다이아몬드 공구로 세라믹을 절삭할 때, 각각의 nose 반경에서 플랭크 마멸량의 변화는 Fig. 4로 나타난다. 공구의 nose 반경이 0.8mm일 때, 절삭속도 48m/min, 20m/min에서는 플랭크 마멸량은 각각 0.18mm, 0.07mm이고, nose 반경이 0.2mm에서는 0.21mm, 0.08mm로 나타나며, 일정한 절삭조건에서 공구의 nose 반경이 작은 공구일수록 플랭크 마멸이 더욱 심하게 나타난다. 이 원인은 nose 반경이 크면 단위 절삭날當 切削量이 적어지는 결과, 공구 날끝을 통해 절삭열의 擴散이 잘 일어나기 때문이라고 생각된다.

또, 절삭초기과정에서 절삭된 피삭재를 관찰한 결과, 공구의 nose 반경이 큰 공구일수록 加工表面의 모서리 부분에 더 많은 칩핑이 발생하고 있다.

(나) 플랭크 마멸과 加工面의 狀態

이송량 0.012mm/rev, 절삭깊이 0.1mm로 절삭했을 때, 절삭시간에 따른 플랭크 마멸상태를 나타낸 것이 Fig. 5이다. 절삭속도 10m/min, 20m/min, 40m/min, 70m/min, 100m/min로 변화할 때, 플랭크 마멸량의 진행상태이며, 절삭속도의 증



Cutting speed:48m/min,20m/min
Depth of cut:0.2mm,0.1mm
Feed:0.02mm/rev,0.012mm/rev
Wet cutting time:10min

Fig. 4 Flank wear vs. nose radius

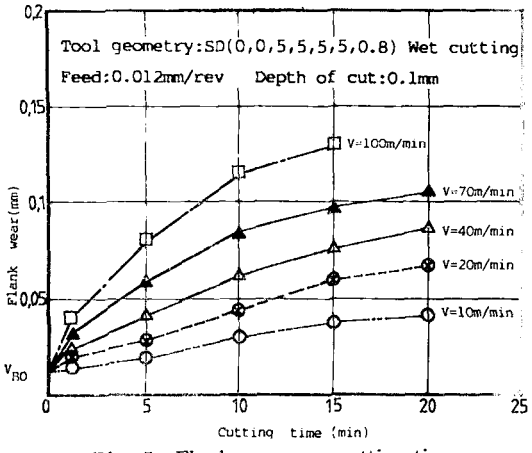


Fig. 5 Flank wear vs. cutting time

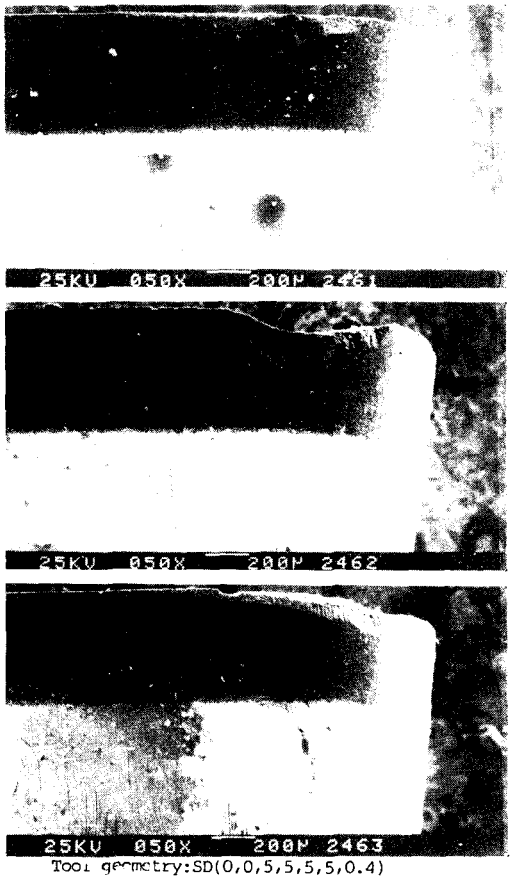


Fig. 6 The flank wear of sintered dimond tools at a cutting speed, [(a) V : 10m/min, (b) V : 20 m/min, (c) V : 70m/min]

가에 따라, 플랭크 마멸은 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히, 一般鋼材의 절삭시와 마찬가지로 공구의 플랭크 마멸은 절삭초기 단계에서 初期磨滅現象이 일어나고 있으며, 본 실험에서 나타난 初期磨滅量(V_{BO})은 0.015mm 정도이다.

또, 절삭속도의 변화에 따른 플랭크 마멸의 형태를 관찰하기 위해, 절삭속도를 10m/min, 20m/min, 70m/min로 고정하여 10분간 절삭한 공구의 플랭크 마멸형상이 Fig. 6이다. Fig. 6(a)는 절삭속도 10m/min에서 나타난 마멸로, 피삭재의 硬質粒子에 의한 아브레시브(abrasive) 마멸과 함께, 공구의 플랭크면이 칩핑된 흔적이 보이고, Fig. 6(b)는 절삭속도 20m/min에서 날끝과 境界部 사이에 생긴 마멸이며, 그 형태는 正常磨滅에 가깝다.

한편, Fig. 6(c)는 고속인 절삭속도 70m/min에서 나타난 플랭크 마멸이며, 공구와 피삭재의 마찰로 생긴 切削熱로 날끝 부위가 크게 마멸되어 있다.

위의 3가지 절삭조건에서 크레이터 마멸도 조사하였으나, 크레이터 마멸량은 세라믹 절삭인 경우에 분말상 칩이 배출되어서 칩과 공구 경사면 사이의 마찰거리가 짧아지므로 플랭크 마멸에 비해 아주 적다.

소결 다이아몬드 공구로 세라믹을 절삭할 때, 주절삭 날끝과 부절삭 날끝의 접촉부위에 따라 형성된 가공표면과 공구가 지나간 뒤에 다듬질면에 나타난, 크랙 및 變形狀態를 조사하기 위해 연속 段車 가공한 피삭재의 각 단면의 SEM 사진이 Fig. 7이고, 소성변형 상태를 면밀히 관찰하기 위해서, 비교적 nose 반경(0.8mm)이 큰 다이아몬드 공구로 실험하였다.

Fig. 7(a)는 절삭초기의 피삭재의 코우너 부위로 공구와 피삭재의 충돌로 인하여, 세라믹 粒子의 덩어리가 크게 떨어져 나간 凹형 크레이터 磨滅이다. Fig. 7(b)는 작은 원통면과 큰 원통면의 교차된 직각단면부로 투울 마아크에 직각 방향으로 開口된 크랙이 나타나고, 그 길이는 각각 다르다. 이 면은 공구가 원통면 (a)과 수직면 (b)이 동시에 접촉되어 압축응력과 熱應力으로 심하게 塑性變形된 부분으로, 공구가 지나가고 나면, 피삭재의 일부분이 回復되어 있으나, 그의 대부분의 입자들은 본래의 위치에서 離脫, 또는 밀려난 상태로 존재하게 된다.

Fig. 7(c)는 직경이 큰 원통부에 세라믹 입자가 억지로 탈락되어 생긴 가공표면이며, 이 원통면 중에서 가장 거칠게 보이는 부분이고, 그외 다른 부

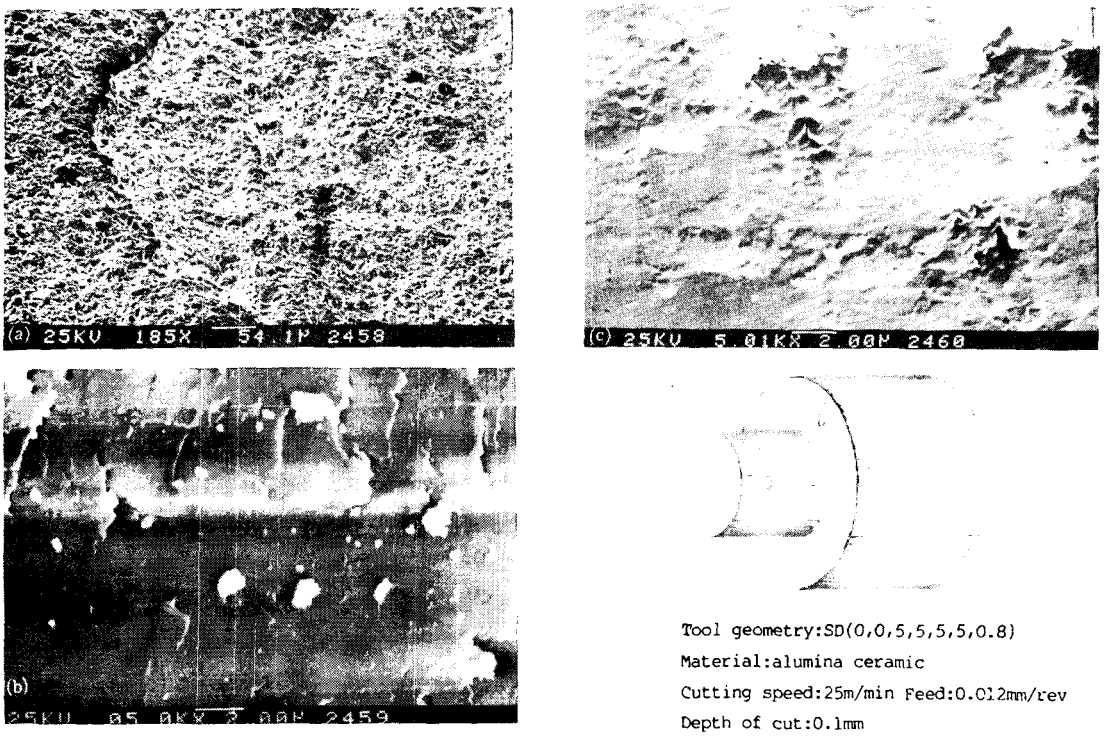


Fig. 7 The SEM photographs of machined surface

위는 아주 미세하고 매끈하여, 마치 거울면과 같다. 이러한 가공면은 피삭재가 공구의 날끝에 壓着되어 소성유동을 받아, 생성된 것으로 보인다. 그래서 절삭가공에 의해, 이러한 정도의 가공면만 얻어진다면, 세라믹의 정밀가공도 실용성이 있을 것이라고 믿어지고 있다.

(2) 건식절삭

Fig. 8은 절삭깊이 0.15mm, 이송량을 각각 0.015mm/rev, 0.02mm/rev로 세라믹을 절삭할 때, 절삭속도의 변화에 딴 공구수명곡선이다. 절삭속도 20~100m/min 범위에서, 이송량에 대한 공구수명곡선은 거의 동일한 기울기로 직선적인 경향을 나타내고 있으나, 10m/min, 20m/min의 낮은 절삭속도에서는 공구수명이 일정한 값이 된다.

Fig. 9는 절삭속도 70m/min에서, 10분간 습식〔Fig. 9(a)〕과 乾式〔Fig. 9(b)〕으로 절삭한 후에 촬영한 크레이터 마멸상태이다.

Fig. 9(a)는 파괴규모가 작은 칩핑 흔적이 보이나 플랭크 마멸이 적기 때문에, 전반적으로 공구輪廓은 뚜렷하게 나타나고 있다. 반면에, 습식절삭인 경우 Fig. 9(b)는 공구 날끝부근에 큰 크레이터

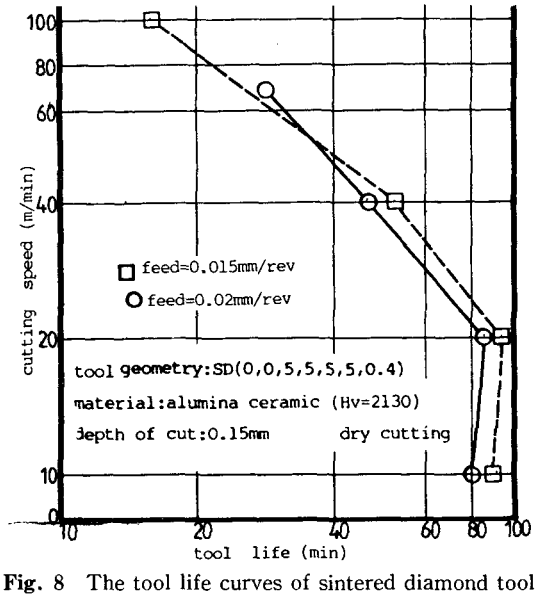


Fig. 8 The tool life curves of sintered diamond tool when machining alumina ceramic (flank wear)

마멸의 발생과 많은 곳에 칩핑이 나타나고 있다.

그리고, 이 공구들로 10분간 절삭하여, 가공된 피삭재의 가공면의 표면거칠기 R_{max}값을 측정해

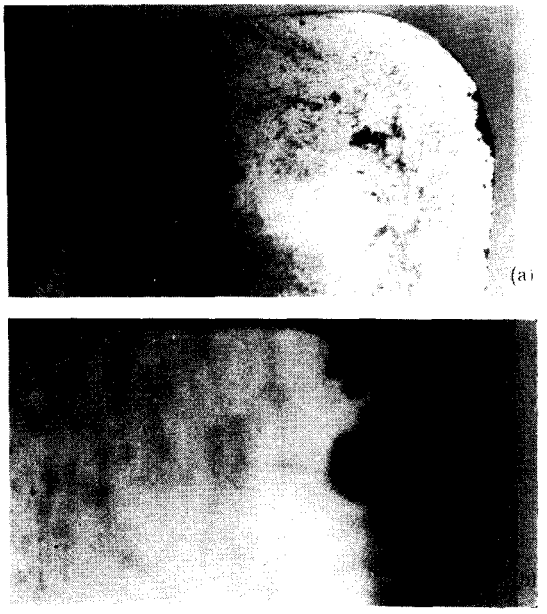


Fig. 9 The feature of SD tool wear (a) when using water miscible cutting fluids, and (b) when using no fluids.

본 결과, 습식인 경우가 2.4μm인데 비해, 건식에서는 약 2배 정도 거친 5μm로 나타났다.

이와 같이, 공구마멸의 정도에 따른 표면거칠기의 단순한 비교를 통해서도 습식절삭인 경우가, 플랭크 마멸이 적고 표면 精密度가 높은 원인은 절삭유의 냉각 및 윤활작용으로 절삭기구의 切削溫度가 낮아지기 때문이라고 생각된다.

3.3 표면거칠기의 영향

Fig. 10은 절삭속도 20m/min로 습식절삭할 때, 절삭깊이가 각각 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm에서 이송량의 변화에 따른 표면거칠기 R_{max}값을 나타낸 것이다. 절삭깊이가 증가할수록, 표면거칠기(R_{max})는 나빠지고, 加工面의 형상은 波形으로 가공되고 있다. 또, 절삭깊이가 일정할 때는, 이송량이 증가할수록 표면거칠기가 거칠어지고, 최대표면거칠기 차이는 절삭깊이 0.2mm, 이송량 0.01mm/rev와 절삭깊이 0.2mm, 이송량 0.05mm/rev의 사이에서 나타나고, 그 값의 차이는 17μm 정도이다.

그리고, 일정 이송량에 대해 절삭깊이를 각각 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm로 하여, 절삭속도의 변화에 따른 加工面의 표면거칠기 상태를 나타낸 것이 Fig. 11이다. 그 결과, 표면거칠기는 이송량이 증가할 때와 같이, 절삭속도의 증가에 따라서도 점진적으로 거칠어지고 있다.

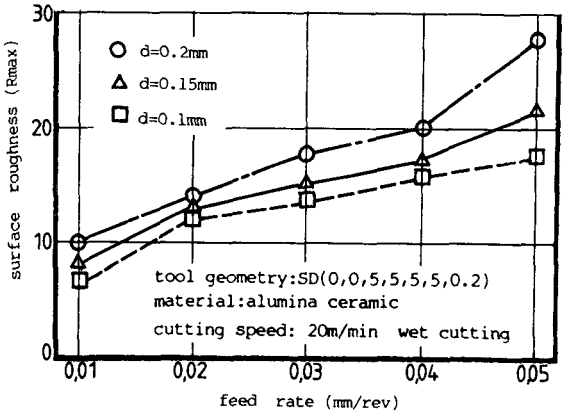


Fig. 10 Feed rate vs. surface roughness

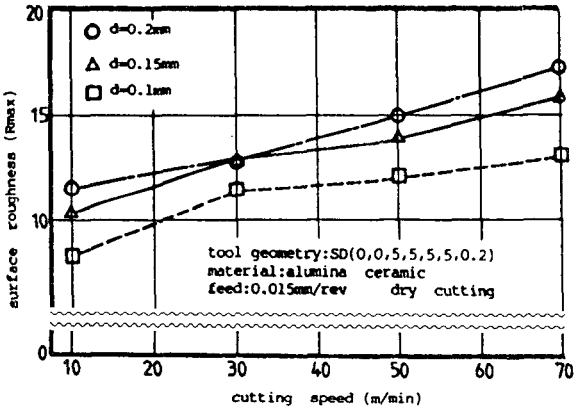


Fig. 11 Cutting speed vs. surface roughness

이 원인은 절삭속도가 증가할수록, 세라믹의 破壞規模가 커져서 표면거칠기가 증가하고 가공면도 불규칙적인 파형이 되기 때문이라고 생각된다.

3.4 절삭저항

절삭속도 25m/min, 절삭깊이 0.1mm에서 이송량의 증가에 따른 切削抵抗의 변화는 Fig. 12와 같다. 이송량 0.01mm/rev에서 背分力, 主分力, 移送分力이 각각 140N, 60N, 50N이고, 이송량 0.03mm/rev에서는 190N, 70N, 65N으로 증가한다. 특히, 이송량 0.03mm/rev에서 주분력과 이송분력의 차이가 제일 작다.

파인 세라믹을 절삭할 때에 절삭저항의 特性의

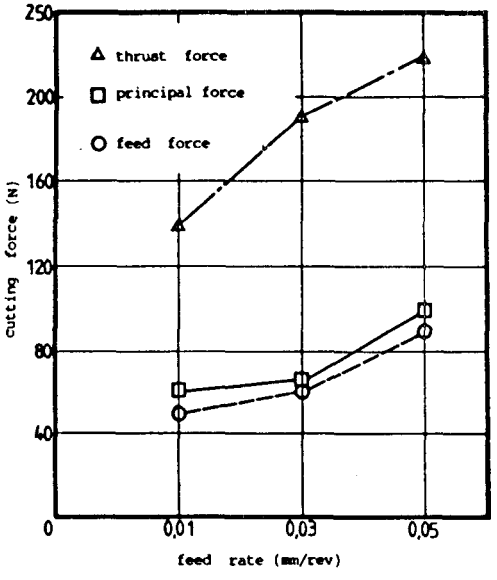


Fig. 12 The variation of cutting force components with feed rate

하나로 절삭저항 성분 중, 背分力이 主分力에 비해 현저히 크게 되며, 이러한 현상은 세라믹(Hv2130)과 같이, 경도가 큰 피삭재에 공구가 파고 들어 가기가 힘들기 때문이라고 생각된다.

또, 세라믹 절삭에서, 主절삭날면의 플랭크 마멸보다 主절삭날면과 副절삭날면에 만나는 날끝 부위(切刀稜)의 磨滅이 큰 원인은, 피삭재의 가공면과 공구의 날끝 사이에 배분력이 크게 작용하게 되어, 피삭재의 硬質粒子가 공구의 여유면위를 심하게 아브레시브 마찰을 시키기 때문이라고 생각된다.

4. 結 論

알루미나계 세라믹(99.6%)을 2차원 절삭가공을 할 때, 燒結 다이아몬드 공구(nose radius : 0.2 mm, 0.4mm, 0.8mm)에 의한 被削性을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정한 절삭속도(70m/min)에서, nose 반경 0.4mm의 소결 다이아몬드 공구가 이송량 0.02 mm/rev, 0.15mm/rev, 0.01mm/rev으로 감소될수록 채터링이 더욱 더 발생하기 쉽고, 특히 작은 이송량, 높은 절삭속도로 변화하면, 乾式 절삭가공이 곤란할 정도로 채터링이 발생한다.

(2) 공구날끝의 nose 반경이 0.2mm에서 0.4mm로 증가하면, 플랭크 마멸이 감소되지만, 절삭초기 단계에서 세라믹 모서리 부분의 칩핑을 방지하기 위해서는, 오히려 nose 반경이 작아야 한다.

(3) 乾式절삭에서 양호한 절삭조건은 이송량 0.02mm/rev, 절삭깊이 0.15mm에서, 절삭속도가 20~40m/min 범위이나, 동일한 이송량 및 절삭깊이에서 습식절삭을 하면 70~100m/min의 절삭속도 범위에서도 절삭가공이 가능하며, 가공면의 표면거칠기도 우수하다.

(4) 鋼材의 절삭에서는 主分力이 제일 크나, 세라믹 절삭에서는 이송량 0.01~0.05mm/rev 구간에서 背分力이 현저히 크다.

참 고 문 헌

(1) 松井正己, 1986, "セラミツクスの精密研削加工", 機械の研究, Vol. 38, No. 3, pp. 27~33.
(2) 小峰進, 1987, "ダイヤモンド砥石によるセラミツクスの研削加工", 機械技術, Vol. 32, No. 8, p. 41.
(3) 岡村健二郎, 中川平三郎, 金東燮, 1985, "フアインセラミツクスの機械加工にする基礎研究", 精密機械, Vol. 51, No. 10, pp. 123~128.
(4) 德山曹達, 古田和哉, 1987, "マジナブルセラミツクスの切削加工", 機械技術, Vol. 35, No. 2, p. 54.
(5) 鳴瀧 則彦, 李 載佑, 野口 和男, 水谷 豐信, 1986, "セラミツクス假燒材の被削性(第1報)", 精密機械, Vol. 52, No. 11, pp. 48~53.
(6) 富森紘, 1984, "エンジニアングセラミツクスの機械加工", 機械の研究, Vol. 32, No. 4, pp. 45~51.
(7) 鳴瀧 則彦, 1986, "CBN 工具による切削加工技術", 機械の研究, Vol. 32, No. 12, pp. 32~37.