

*이 논문은 1989년도 한국기계연구소와 공동연구에 의해 수행되었음.
*이 논문은 한국정밀공학회 89년도 추계학술대회에서 발표되었음.

파인세라믹의 연삭가공특성

정 윤교,* 강 재훈**

Grinding Characteristic of Advanced Ceramics

Yoon-gyo Jung,* Jae-hoon Kang**

Abstract.

Advanced ceramics have some excellent properties as the material for the mechanical component. It is, however, very difficult to grind ceramics with high efficiency because of their high strength, hardness and brittleness. In this paper, some experiments are carried out to find the basic grinding characteristic of advanced ceramics. Representative advanced ceramics, such as Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC and Si_3N_4 are ground with diamond wheels. Special attention is paid to comparison between the conventional and creep feed grinding. Results obtained in this study provide some useful informations to attain the high efficiency grinding of advanced ceramics.

Key words : Advanced Ceramics, Grinding, Diamond Wheel, Grinding Force, Surface Roughness, Grinding Stiffness, Grinding Ratio

*국립 창원대학교 기계공학과
**한국 기계연구소

1. 서론

경도, 강도, 내열성, 耐食性, 내마모성의 관점에서 우수한 특성을 가지는 수많은 파인 세라믹이 개발되어져, 그들의 특성이 활용되어지는 분야에 폭넓게 채용되어지고 있다. 세라믹 부품의 제조에 있어서는 燃結과정에서의 재료의 수축을 피할 수 없고 최종적인 재료의 精度를 내기 위해서는 機械加工을 필요로 하고 있다.

오늘날, 일반적으로 파인세라믹의 기계가공으로서 널리 사용되어지고 있는 것은 다이아몬드 슛돌에 의한 研削가공이다.⁽¹⁾ 그러나 파인 세라믹은 高硬度脆性재료이기 때문에, 연삭가공이라 할지라도 용이하지 않고 高能率의 研削加工法의 確立이 무엇보다도 요망되어지고 있는 것이 現狀이다.

본 연구에서는 高硬強性 세라믹으로서 대표적인 알루미늄, 질리코니아, 炭化珪素, 窒化珪素를 선택하여, 이들을 다이아몬드 슛돌로 고능률적으로 연삭가공을 수행하기 위해서 필요한 研削加工 特性을 把握하는 것을 그 목적으로 하고 있다. 이러한 목적을 위해서, 크리-프피드 연삭까지 포함한 폭넓은 연삭조건범위에서 평면연삭을 수행해, 각종 세라믹의 被研削性を 연삭抵抗, 表面거칠기, 研削比 등의 관점에서로부터 비교, 검토 했다.

2. 실험장치 및 실험방법

표1에는 본 실험에서 사용한 세라믹의 機械的 特性을 표시한다.

표 1. 실험에 사용된 세라믹의 기계적 성질

Table.1 Mechanical properties of advanced ceramics

Materials	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	SiC	Si ₃ N ₄
Vickers hardness (GPa)	20	13	25	15
Bending strength (MPa)	304	980	490	588
Young's modulus (GPa)	344	206	392	294
Density(g/cm ³)	3.8	5.9	3.1	3.2
Poisson's ratio	0.25	0.31	0.1	0.28

본 실험에서 사용한 研削盤은 平面研削盤(GHL-B306-4)으로 주축動力은 3.75kW이다. 테이블 驅動은 크리-프피드연삭이 가능하도록 改造했다. 연삭 저항은 KISTLER社製 9257A형 동력계로, 연삭동력은 VALENITE社製(720-002/305)파워 모니터로 측정했다.

이들은 구성은 그림1에 표시한다. 가공후의 표면거칠기는 觸針式組度器(E-RM-D100B)로 측정했다.

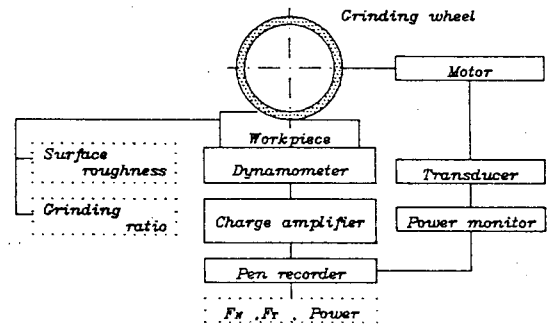


Fig.1 Experimental set-up

그림 1. 실험장치의 개요

표 2. 연삭조건

Table.2 Grinding Condition

Grinding machine	Surface grinding machine HITACHI SEIKO CO.,Ltd (GHL-B306-4)
Power of main spindle	3.75 KW
Grinding types	Up and down cut grinding Conventional and creep-feed grinding
Grinding wheel	ASD170R100B56-3 MITSUBISHI METAL CORP. MD170NM00M9-3 #=300mm d _s =15mm
Workpiece	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , SiC, Si ₃ N ₄
Wheel speed(V _w)	0 - 32 m/s (0 - 2000 rpm)
Table speed(V _w)	Conventional grinding 4.0 - 36.0 m/min Creep-feed grinding 10 - 240 mm/min
Depth of cut(h)	Conventional grinding 1 - 30 μm Creep-feed grinding 1000 - 2000 μm
Truing	Brake truer(C150M) #=75mm d _s =25mm
Dressing	Abrasive dressing stick(C220CBF) 150×25×25(mm)
Grinding fluid	Water miscible solution type (40:1)

표2에는 實驗條件을 나타낸다. 본 연구에서 通常 연삭이라는 가공방식의 연삭조건은 연삭깊이로서는 약 30μm이하, 테이블속도는 4m/min이상의 일반적

인 往復平面연삭조건인 범위이고, 연삭깊이로 100 μ m 이상, 테이블속도가 240mm/min이하의 조건을 크리프-피드연삭의 범위로 했다.

3. 연삭칩의 觀察

세라믹의 연삭現象을 파악할 목적으로, 연삭칩을 採集해서 그 形狀을 電子현미경으로 관찰했다. 우선 그림2는 알루미늄과 질화규소를 통상연삭한 경우의 연삭칩의 사진이다. 비교를 위해 금속(SM45C)을 동일조건에서 연삭할 때의 연삭칩도 동시에 표시하고

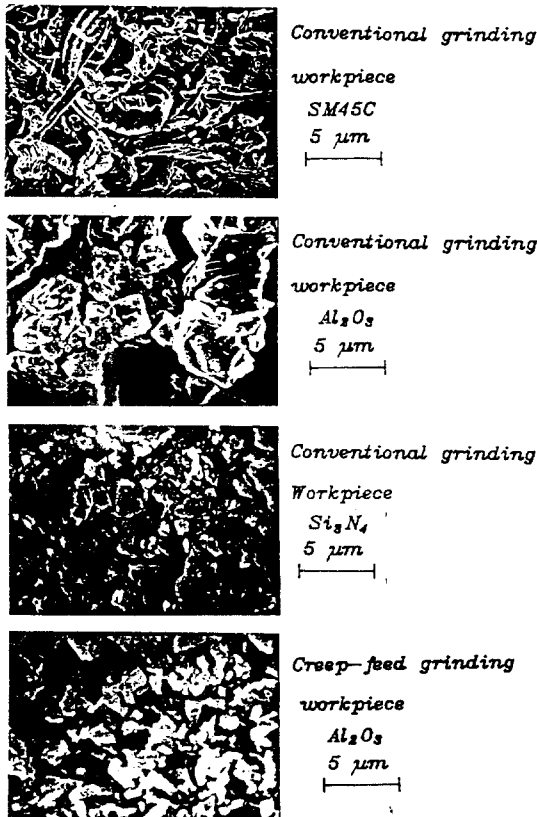


Fig. 2 Observation of grinding swarf of steel and ceramics

그림 2. 통상연삭과 크리프피드 연삭에서의 연삭 칩형태의 전자현미경사진

있다. SM45C는 剪斷變形에 의해 연삭칩이 形成되어 있는 것에 비해, 세라믹의 경우는 微小한 脆性破壞가 主體로 되어 있는 것을 잘 알수 있다.

또 그림2는 알루미늄의 연삭칩을 통상연삭범위와 크리프 피드 연삭범위내에서 비교하고 있다. 크리프 피드 연삭쪽이 幾何學的 平均연삭칩의 斷面積이 적게되기 때문에, 發生되어지고 있는 연삭칩破片의 크기도 작다. 더구나, 연삭칩의 형태는 미소한 취성 파괴가 주체로 되어 있는 것에 변함없다. 이들의 관찰로보터 세라믹의 연삭기구는 본 연구의 실험 범위에 있어서는 주로 材料의 微小脆性破壞에 의해 進行하고 있다고 생각할 수 있다.⁽²⁾

4. 연삭저항

4-1 通常연삭

그림3은 알루미늄 세라믹을 레진본드 다이아몬드 스톨로 연삭했을 때의 스톨單位幅當의 法線研削抵抗 F_n 및 接線연삭저항 F_t 를 나타낸다. 그림3으로부터 알 수 있는 바와같이 테이블속도가 크게되면 연삭깊이의 增加에 대한 연삭저항의 증가가 크게됨을 알 수 있다. 알루미늄, 질리코니아, 탄화규소, 질화규소 어느경우에도 같은 傾向이 얻어졌다.

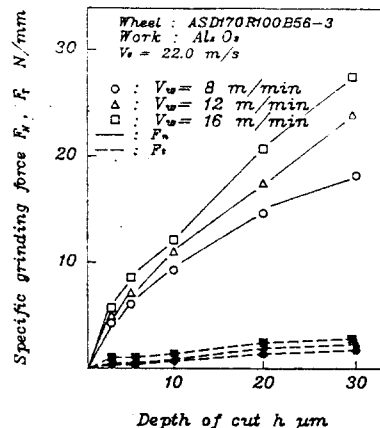


Fig. 3 Relationship between specific grinding force and depth of cut

그림 3. 연삭깊이 및 테이블속도와 연삭저항과의 관계

그림4는 테이블속도 $V_w=8m/min$ 의 경우 각종세라믹의 접선연삭저항을 표시한 것이다. 탄화규소, 질리코니아, 질화규소의 접선연삭저항은 거의 같은 값을 표시하고 있지만 그중에서 질화규소의 연삭저항이 가장크고 알루미늄이 다른 3종류의 세라믹에 비교해 연삭저항이 현저하게 낮다. 이러한 경향은 범선연삭

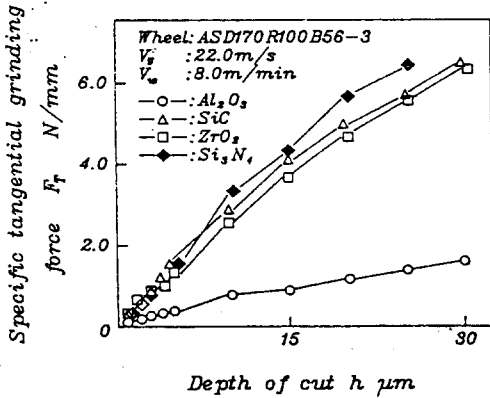


Fig. 4 Specific tangential grinding force in ceramics grinding

그림 4. 각종 세라믹의 접선연삭저항의 비교

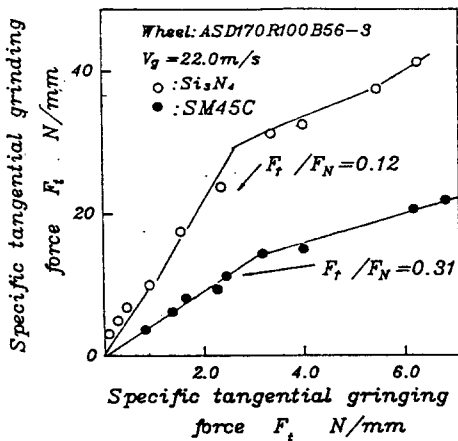


Fig. 5 Grinding force component in ceramics and steel grinding

그림 5. S45C와 질화규소의 F_n 과 F_r 의 관계

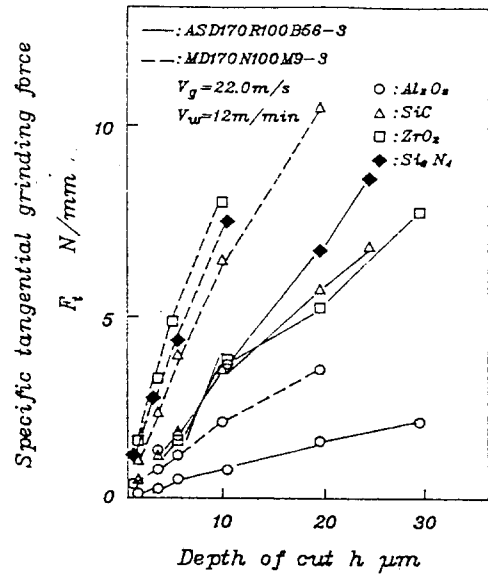


Fig. 6 Relationship of grinding force between metal and resinoid diamond wheel

그림 6. 숯돌결합체의 상이에 의한 각종 세라믹의 연삭저항

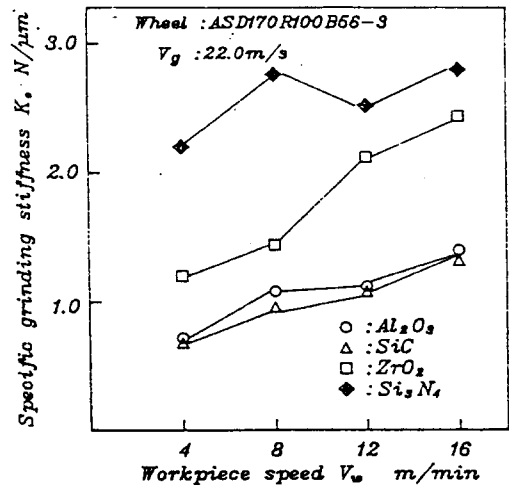


Fig. 7 Specific grinding stiffness of ceramics

그림 7. 각종 세라믹의 비연삭강성

저항에서도 같은 결과를 얻었다.

그림5은 레진본드 다이아몬드숯돌로 연삭한 SM45

C와 질화규소의 법선연삭저항과 접선연삭저항과의 관계를 표시하고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 동일한 접선연삭저항의 경우 질화규소가 SM45C에 비해 법선연삭저항이 현저히 큰 것을 알 수 있다. 이것은 高強硬材料를 연삭가공했을 때의 특징이라고 생각되어지고 슛들切刃이 재료에 貫入하기 어렵기 때문이라고 思料된다.

그림6은 結合력이 비교적 약한 레진본드 다이아몬드 슛들과, 強韌한 메탈본드 슛들의 접선연삭저항을 비교한 것이다. 4종류의 세라믹 어느것도 레진본드 슛들보다 메탈본드 슛들의 접선연삭이 크게됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 법선연삭저항에 있어서도 같은 결과가 얻어졌다.

그림5에서 표시한 것처럼 세라믹의 연삭에 있어서는 법선방향의 연삭저항분력이 일반 金屬을 연삭한 경우에 비교해서 현저하게 크다. 이것은 設定된 연삭깊이에 대해 연삭殘余分の 양이 증대하는 것을 意味하고, 加工精度를 높이는데 중요한 問題가 된다. 이러한 性質은 단위 연삭깊이당의 법선연삭저항의 増分, 즉 研削剛性으로서 檢討할 수 있다.

그림7은 각종 세라믹의 比研削剛性(단위스숫돌폭당의 연삭강성)을 측정할 결과이다. 단 이들의 결과는 연삭깊이가 비교적 작고 연삭깊이와 법선연삭저항과의 관계가 거의 線形으로 가정할 수 있는 범위에서 취한 데이터이다. 그림으로부터, 工作物 速度가 크게되면 비연삭강성이 증가하는 것, 또 질화규소의 연삭강성이 다른 세라믹 재료에 비해 현저하게 높은 것을 알 수 있다.

4-2 크리-프피드 연삭

각종 難削材의 成形平面研削에 있어서 높은 연삭깊이와 超低테이블速度를 특징으로 하는 크리-프피드 연삭이 그 威力를 발휘하고 있다. 이 연삭방식은 공작물을 통상 1패스로 연삭하기 때문에, 테이블 往復에 따르는 非研削時間이 현저하게 적어지고, 각 切刃에 걸리는 負荷가 적기 때문에 연삭표면거칠기의 向상이 기대되어진다.⁽³⁾ 이하에는 세라믹연삭에 크리-프피드 연삭방식을 適用시켜 통상연삭과의 研削特性을 比較함에 의해 그 問題點에 관해서 검토했다.

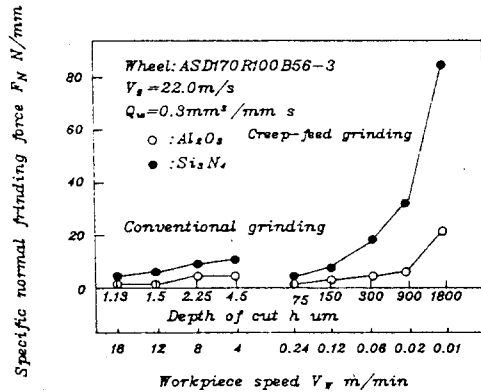


Fig. 8 Specific normal grinding force in ceramic grinding
그림 8. 통상연삭과 크리프피드 연삭의 법선연삭 저항의 비교

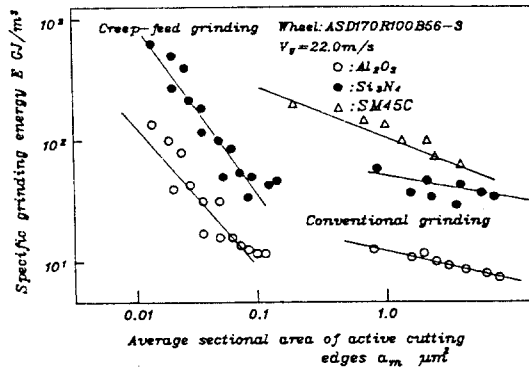


Fig. 9 Specific grinding energy of ceramics
그림 9. 평균 연삭집단 면적과 비연삭에너지와의 관계

그림8은 比研削率을 一定($Q_w = 0.3 \text{ mm}^3/\text{mm s}$) 하제한 경우, 통상연삭과 크리-프피드 연삭의 법선연삭저항을 비교한 결과이다. 크리-프피드 연삭의 경우, 알루미늄, 질화규소 어느것도 어떤양의 연삭깊이를 超過하면 연삭저항이 急増하고 있는 것을 알 수 있다. 이것에 비해 통상연삭 범위에서는 연삭저항이 크리-프피드 연삭에 비교해서 현저하게 낮고 연삭저항의 큰 증가는 보이지 않는다.

이 결과로부터 일정한 研削率에 있어서는 공작물의 속도가 빠르고 연삭깊이를 적게한 연삭방식이 연삭저항을 抑制하는데 有利하다는 것을 알 수 있

다.

그림9는 平均研削칩 斷面積과 比研削에너지와의 關係를 표시한다. 여기서 비연삭에너지 E는 다음식에 의해 구했다.

$$E = \frac{F_t \times V_g}{V_w \times h \times b} \dots\dots\dots (1)$$

Ft는 接線研削抵抗, Vg는 숫돌의 周速度, Vw는 테이블속도, h는 연삭깊이, b는 숫돌의 폭이다. 또 平均연삭칩 단면적 am은

$$a_m = w^2 \frac{V_w}{V_g} \frac{h}{VD} \dots\dots\dots (2)$$

로 구했다. 세라믹의 研削機構는 前述한 것처럼 재료의 微小脆性破壞가 主體로 되어있다. 따라서 平均연삭칩 단면적이라는 파라메타를 사용하는 것은 嚴密하게 문제가 있다. 그러나, 여기에서는 숫돌의 切刃과 被研削材와의 幾何學的 干涉狀態를 表現하는 파라메타라는 의미에서 식(2)에서 주어진 양을 사용하는 것으로 했다. 여기에서 D는 숫돌의 直徑, w는 平均粒子間隔을 표시한다. (4)

그림9에서 알루미늄과 질화규소를 비교한 경우, 질화규소의 비연삭 에너지가 큰 것을 알 수 있다. 또 통상연삭조건외 범위에 있어서는 平均연삭칩 단면적의 변화에 대한 비연삭에너지의 變化幅이 적지만, 크리-프피드연삭의 領域에서는 平均연삭칩 단면적의 減少에 따라서 급격히 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 微小脆性破壞와 延性的 塑性變形의 比率의 大小에 起因하는 것으로 推測된다. 또 그림중에는 SM45C를 동일한 다이아몬드 숫돌로 연삭가공할 때의 관계를 표시하고 있는데, 세라믹에 비교해서 비연삭 에너지가 크게 되어짐을 알 수 있다. 일반적으로 세라믹의 연삭가공은 금속에 비교해 곤란하다고 말하여지고 있지만, 이들의 결과는 세라믹의 가공이 취성파괴에 의하여 진행되고 있는 경우 금속보다는 容易하다는 것을 보여주고 있다.

각종 세라믹의 크리-프피드 연삭을 續行하면 숫돌 粒子의 摩滅의 摩耗가 급격히 진행하기 때문에, 연

삭저항 및 연삭消費動力의 급격한 증가가 보인다. 그림10은 알루미늄을 크리-프피드 연삭한 경우의 연삭저항 및 연삭소비동력의 급증을 나타내는 實驗結

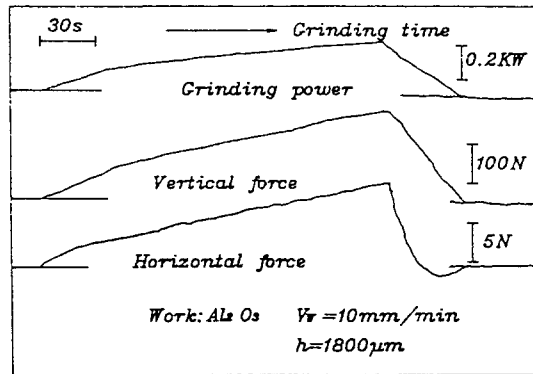


Fig. 10 Increase of grinding force and power in ceramics grinding

그림10. 크리프피드 연삭에 있어서 연삭저항과 소비동력의 실측예

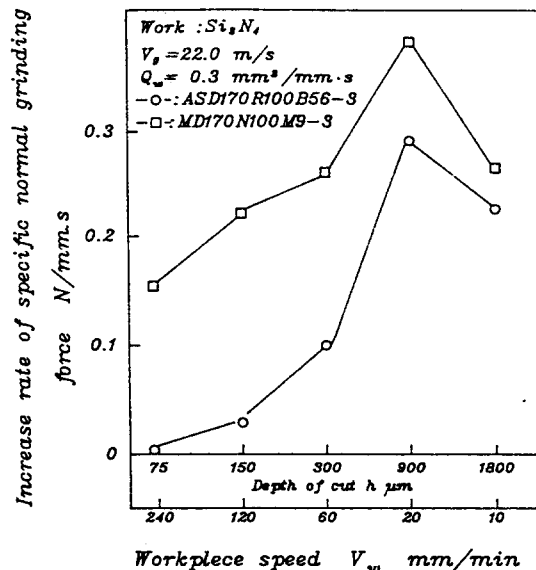


Fig. 11 Increase rate of grinding force in ceramics grinding

그림11. 질화규소의 연삭저항의 상승율

果의 한 예이다. 이 결과를 定量的으로 表示하기 위해 크리-프피드 연삭의 범위에서 단위시간당의 법선 연삭저항의 증가, 즉 法線研削抵抗 上昇率에 관해서 검토했다.

그림11은 레진본드 스톨 및 메탈본드 스톨을 사용해서, 크리-프피드 연삭을 실행한 경우 각각의 法線研削抵抗의 上昇率을 비교한 그림이다. 메탈본드의 경우 스톨입자의 결합력이 강하기 때문에 레진본드에 비교해 입자의 摩滅의 摩耗現象이 뚜렷해서, 법선 연삭저항의 상승이 顯著的한 것을 알 수 있다.

5. 연삭 표면거칠기

5-1 통상연삭

本節에서는 각종 세라믹을 통상연삭했을때, 각종 연삭조건이 연삭표면거칠기에 미치는 영향에 관해서 검토를 가했다. 사용된 표면거칠기는 中心線表面거칠기 Ra로 表現했다.

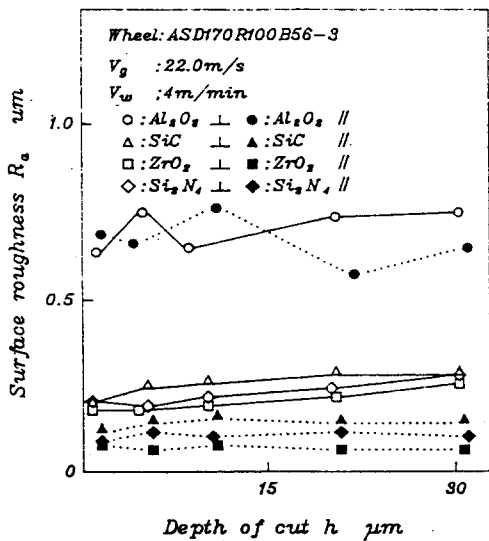


Fig. 12 Influence of depth of cut on surface roughness

그림12. 각종 세라믹의 표면거칠기의 비교

그림12는 각종 세라믹의 研削方向의 표면거칠기 Ra//와 研削直角方向의 표면거칠기 Ra⊥을 연삭깊이에 대해서 표시한 것이다. 4종류의 세라믹중에서

알루미나의 표면거칠기가 가장 나쁘고, 다른 3종류는 거의 同等的한 값을 나타내고 있다. 또 거칠기의 方向性을 비교해 보면 研削條痕의 영향으로 인해 연삭각방향의 거칠기가 약간 나쁜것과 연삭깊이의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

5-2 크리-프피드 연삭

그림13은 알루미나 세라믹을 폭넓게 조건을 바꾸어 연삭을 행했을 경우 연삭방향(Rz//)와 연삭직각방향(Rz⊥)의 最大表面 거칠기의 변화를 표시하고 있다. 통상연삭영역에 비교해 크리-프피드영역에서 거칠기가 급격히 改善됨을 알 수 있다. 더구나 크리-프피드영역에서는 거칠기의 方向性이 明確하게 보이나 통상연삭영역에서는 명확한 차가 나타나지 않는다. 이 결과는 재료의 除去舉動이, 크리-프피드 연삭에 있어서는 塑性的延性破壞, 통상연삭에 있어서는 微小脆性破壞에 支配되어짐을 뒷받침한다.

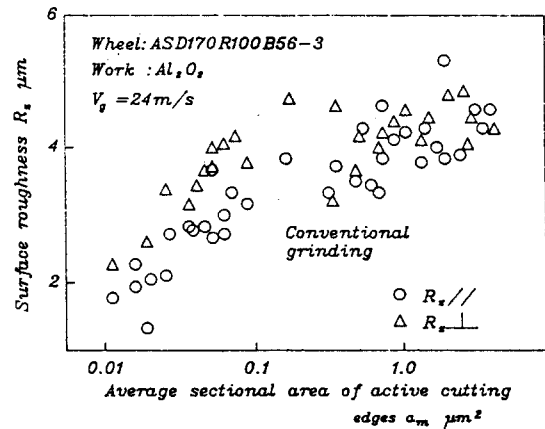


Fig. 13 Relationship between surface roughness and average sectional area of active cutting edges

그림13. 평균 연삭칩 단면적과 표면거칠기와의 관계

6. 연삭비

연삭性能을 평가하는 尺度로서 연삭비 R이 넓게 사용되어지고 있다. 연삭비는 연삭한 공작물의 體積

M를 숫돌의 摩耗量 S로 나눈 값으로 定義된다.

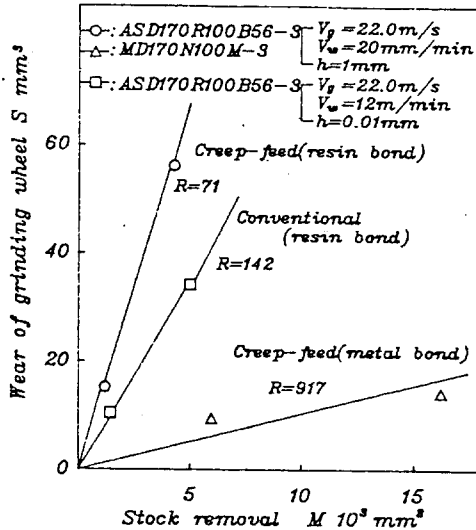


Fig. 14 Comparison of grinding ratio between Conventional and creep-feed grinding

그림14. 각종 연삭조건에 의한 연삭비의 비교

그림14는 레진본드 숫돌과 메탈본드 숫돌의 연삭비 및 통상연삭과 크리-프피드 연삭의 연삭비를 측정 한 결과이다. 橫軸이 累積研削量, 從軸이 숫돌 減耗量을 표시한다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 동일 숫돌의 경우, 통상연삭쪽이 크리-프피드 연삭보다는 연삭비의 값이 크다. 이것은 크리-프피드 연삭 영역에 있어서 숫돌作業面の 摩滅的 摩耗現象이 급격하기 때문이라고 생각되어진다. 또 숫돌의 결합제의 相異를 비교하면 豫想한 바와같이 메탈본드쪽의 연삭비가 현저하게 커짐을 알 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 알루미늄, 질리코니아, 탄화규소 및 질화규소등의 대표적인 파인세라믹을 대상으로 이들을 高能率的으로 연삭가공을 遂行하는데 필요한 연삭특성을 파악할 목적으로 행하여졌다. 이러한 목적 때문에 통상의 평면연삭조건부터 크리-프피드 연삭조

건까지 폭넓게 바꾸어 연삭저항, 연삭동력, 표면거칠기, 연삭비등의 評價項目을 측정해서 세라믹이 가지는 研削特性에 대하여 以下の 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 通常研削범위에 있어서의 세라믹의 연삭결과 는 기본적으로 一般金屬과 유사한 結果를 가짐을 알았다.
- (2) 高能率的인 研削에 대해서는 레진본드 숫돌이, 숫돌의 마모抑制의 側面에서는 메탈본드 숫돌이 有利함을 알았다.
- (3) 칩의 觀察, 比研削에너지의 考察, 表面거칠기의 方向性的 比較를 통해, 파인세라믹의 研削機構는 통상연삭범위에 있어서는 微小脆性破壞가 主體이나 크리프피드 연삭범위로 移動할수록 塑性的 延性破壞가 支配的임을 알 수 있었다.
- (4) 크리-프피드 연삭에 있어서는 研削抵抗의 增大, 研削抵抗 및 연삭動力의 時間的急増, 숫돌摩耗의 增大등 不合理한 점이 多數있어, 파인세라믹의 高能率研削을 達成하기 위해서는 세라믹의 미소취성파괴를 적극적으로 活用할 수 있는 스피드스트로크연삭이 有利하다고 할 수 있다.⁽⁵⁾

參 考 文 獻

- (1) 窯業協會, セラミックス製品及び半製品の除去加工, セラミックス, 18-6, pp. 506-512, 1983.
- (2) 今中, ガラス, セラミックスの砥粒加工, 精密加工, 41-7, pp. 672-679, 1975.
- (3) T. R. A. Pearce, "Prediction of Creep-Feed Grinding Performance from Simple Plunge Grinding Tests", Annals of the CIRP, Vol. 35/1, pp. 223-226, 1986.
- (4) 林, 稻崎, 佐藤, ダイヤモンド砥石による炭化珪素の研削加工, 日本機械學會論文集, 51-467 C編, pp. 1864-1870, 1985
- (5) 稻崎, 最近の高能率研削技術, 日本機械學會誌, 87-783, pp. 133-139, 1984.