38 한국자동차공학회논문집 제2권 제6호, pp. 38~49, 1994.

〈논 문〉 SAE NO. 943767

엔지니어링 세라믹스의 평면 연삭 가공 특성에 관한 연구

A Study on the Surface Grinding Characteristic of Engineering Cramics

강 재 훈,* 허 성 중,* 김 원 일*
J. H. Kang, S. J. Heo, W. I. Kim

ABSTRACT

In this study, grindability of some representative engineering ceramics are experimentally investigated using resin bond diamond wheel with conventional surface grinding machine, and proper grinding conditions which can be obtained from various experimental results are established also for mechanical components which are proper to domestic circumstances with high reliability.

And through the results of experiment, it is confirmed that grinding energies of the ceramics, especially in the case of Al_2O_3, are lower than steel with same machining condition in the conventional grinding because of their fine-brittle fracture mode type removal process, though the ceramics are well-known to unmachinable materials. And moreover, the total pass numbers needed for spark-out process to be completed are depend on their mechanical properties because that grinding stiffness is different from each other. The grinding force, ginding power and ground surface roughness are also measured and compared.

Furthermore, the experiments carried out in this study, some useful results are obtained with can guide to grind engineering ceramics with conventional surface grinding machine.

주요기술용어 : Engineering Ceramics(기계구조용 세라믹스), Resin-Bond Diamond Wheel(레진 본드 다이아몬드 연삭 휠), Conventional Grinding Machine(범용 연삭반), Surface Grinding (평면 연삭), Grinding Characteristic(연삭 특성), Specific Grinding Energy(비연삭 에너지), Dynamic Grinding Stiffness(동적 연삭 강성)

1. 서 론

최근 엔지니어링 세라믹스는 우수한 특성과 다양한 기능성 등으로 미래지향적 첨단산업분야의 전반에 걸쳐 그 핵심 요소 부품의 신소재로써 전세계의 관심을 받고 있다. 특히 구조용 부품재와 차세대형 운송기기의 주요 엔진 부품재로의 응용에 관한 연구는 이미 선진국들을 중심으로

* 한국기계연구원 자동화연구부 선임연구원
* 경남대 대학원
* 경남대 공대 기계공학과 교수

활발히 추진되어져 일부 실용화가 이뤄지고 있는 상태이다.[1] 국내의 경우도 성형, 소결 공정만으로 제작되어지는 일반적인 전자기용 부품등으로 부터 탈피하여 고부가가치적인 기계 부품 요소로의 적용을 위한 요구가 최근 급증하고 있는 실정이다.[2]

하지만 필수적인 소결 공정의 제조법상, 고정도를 요하는 부품화를 위해선 다양한 변형 등을 제어하기 위한 기계적인 제거 가공이 수반되어져야 한다. 일반적으로 엔지니어링 세라믹스는 고경도와 취성을 지닌 난삭재로서 고능률적이고 고품위적인 제거 가공을 수행하기란 쉬운일이 아니다.

따라서 이를 위한 고강성형의 초정밀 전용 연삭 시스템이 선진국에서 개발되어 시판되어지고 있는 한편, 현재 다이아몬드 휠을 사용한 연삭 가공 기법이 가장 주요한 가공법으로 간주되고 있으나, 국내의 산업 현장에선 이에 대한 전문적인 지식이나 경험없이 나름대로의 제거 가공 목적만을 충족시키기 위한 가공을 수행하고 있으며, 대다수의 작업 현장에선 영세성 등으로 인하여 한대의 범용 연삭반으로 총체적인 가공을 수행하고 있는 실정이다. 이와 같은 전반적인 산업 분위기와 비이전 보호 기술로 분류되는 첨단 가공 기술이 정립되어져 있지 않은 국내 사정 등을 고려해볼 때, 무엇보다도 현상황에 맞는 적당한 가공 조건 정립과 가공 데이터 수집, 최적 가공 공정 정립을 통하여 고능률적이고 고품위적인 가공 결과를 최대한 이끌어내는 것이 일반 가장 바람직하다고 생각된다.

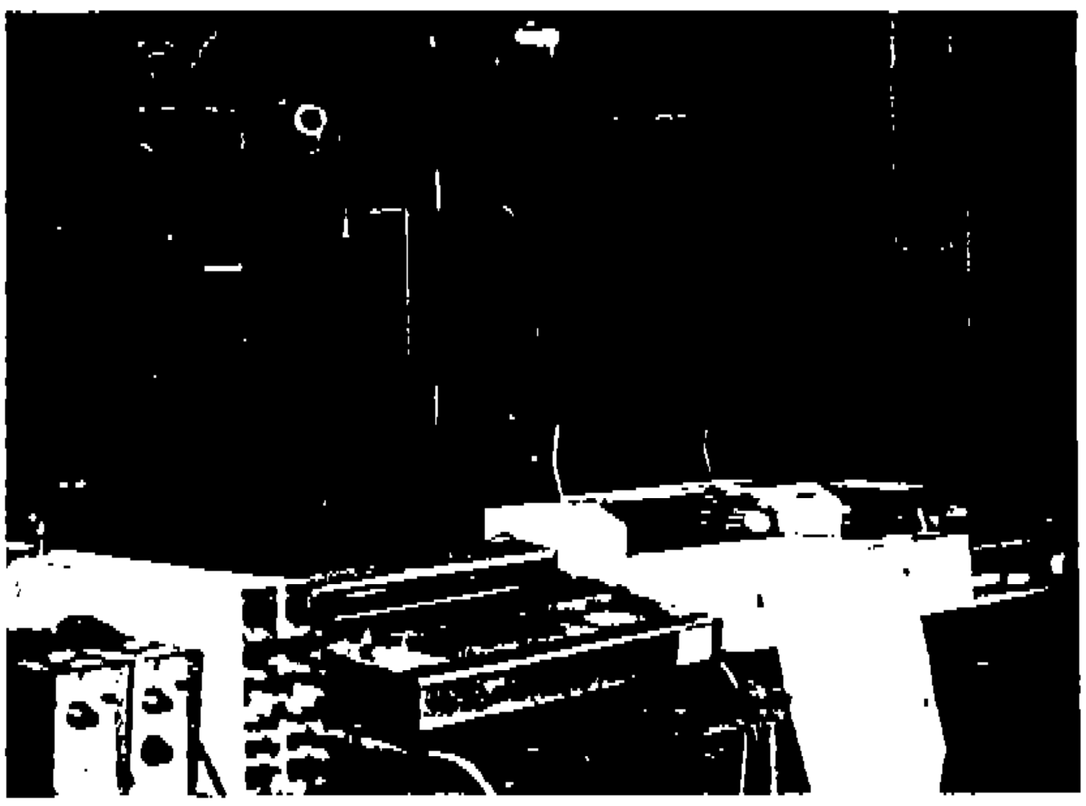
본 연구에서는 우선 엔지니어링 세라믹스의 연삭 가공 특성을 살펴보는 한편, 다양한 가공 실험을 수행하여 가공 데이터를 수집함으로써 최적 가공 조건을 설정할 수 있는 주요한 실험적인 지식을 얻고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

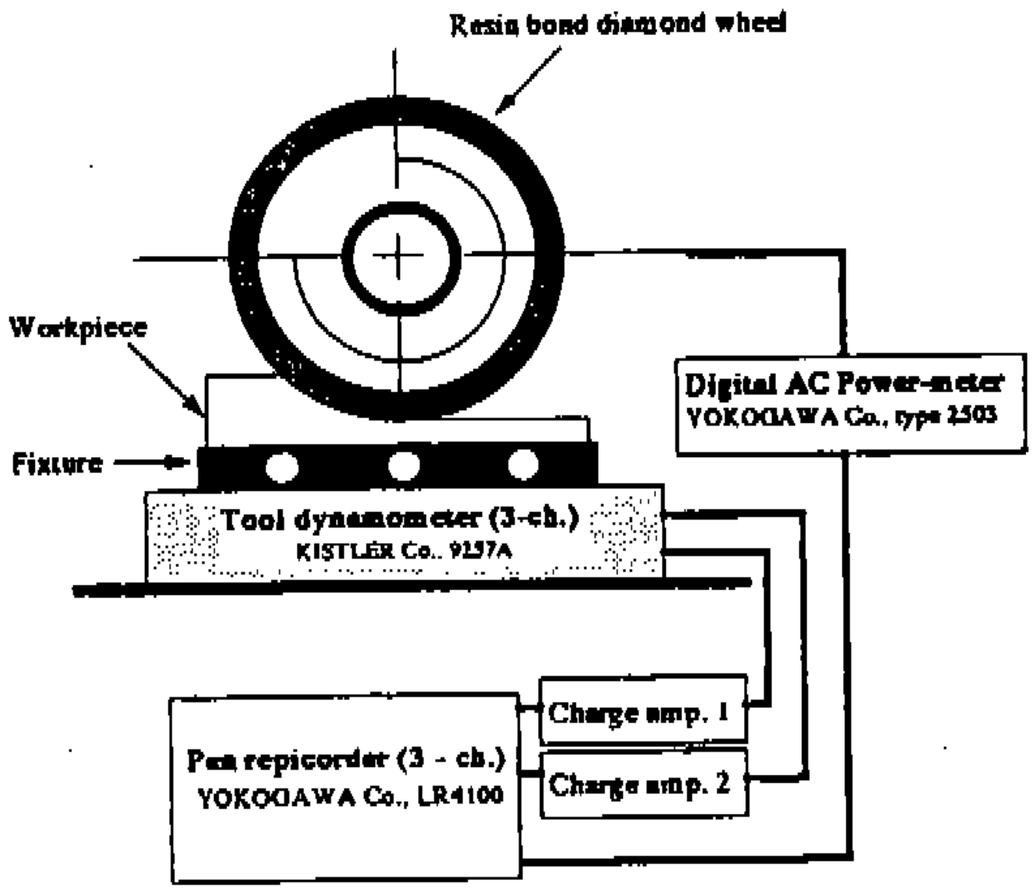
본 실험에서는 대표적인 엔지니어링 세라믹스로서 열기관용 부품 및 기계 구조용 부품 등으로의 적극적인 적용을 추진하고 있는 비산화물계

Table 1 Mechanical properties of workpieces

mechanical properties \ workpiece	Al_2O_3	Si_3N_4	SiC
Vicker's hardness (GPa)	15	16	24
Bending strength (MPa)	295	570	460
Young's modulus (GPa)	335	296	388
Density (g/mm^3)	3.9	3.3	3.2
Fracture toughness ($MN/m^{3/2}$)	2.9	3.2	3.6



(a) Photograph of experimental system



(b) Diagram of experimental equipment

Fig.1 Photograph & diagram of experimental system

Si_3N_4, SiC 세라믹스 및 산화물계 Al_2O_3 세라믹스를 공작물로 선정하여 주문 제작, 사용했으며 그 기계적인 특성치들은 Table 1에 비교하여 나타내 보았다. 그리고 paper filtering 장치와 원심분리식 칩 제거장치를 설계 제작하여 장착한 부분유압식 범용 횡축 평면 연삭반(주축 동력 3.75Kw) 상에서 다양한 사양별의 레진 본드계 다이아몬드 휠을 주문 제작, 사용하여 연삭 가공 실험을 수행하였다.

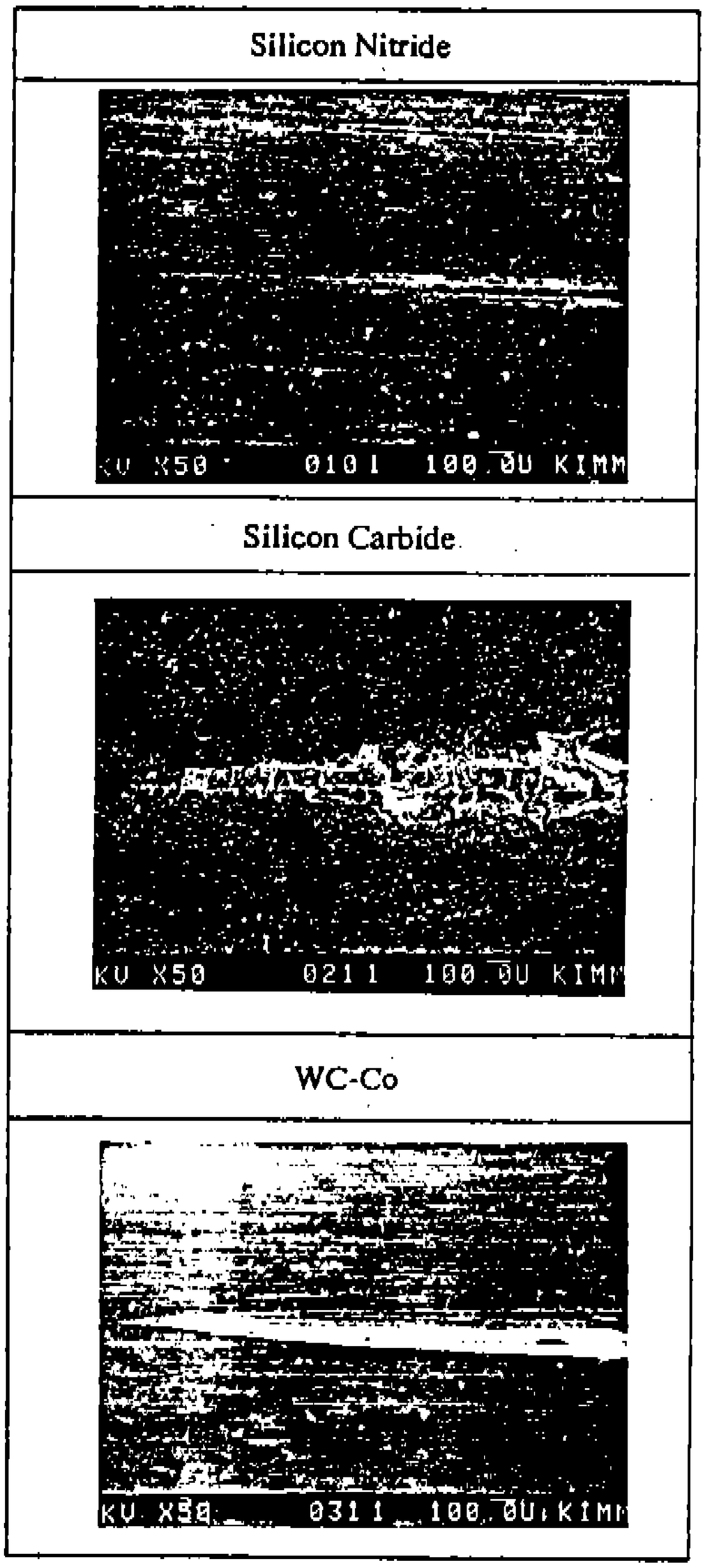
각 실험마다 매회 다이아몬드 휠을 플런지에 장착하여 밸런싱을 잡은후, 다이아몬드 휠의 각 사양에 적절한 조건으로 트루잉과 드레싱을 실행함으로써 자려 진동을 극소화하는 한편, 초기 조건 설정을 동일하게 하여 실험 데이터의 고신뢰성을 추구하였다. 테이블 이송 속도와 절입량, cross-feed rate, spark-out 수 등의 가공 조건들을

Table 2 Experimental condition

Grinding machine (Motor power of grinding spindle)	Vertical type surface grinding machine ELB-SCHLIFF Edmund Lang, Germany, model type SWN-6 3.75Kw
Workpiece	Al_2O_3, Si_3N_4, SiC
Grinding wheel	SDC140N100RW-3.0 SDC170N100RW-3.0 SDC325N100RW-3.0 SDC600N100RW-3.0 SDC1000N100RW-3.0 SDC2000N100RW-3.0 Made in KOREA Size : D300×d76×W15mm
Grinding type	Down & up cutting, Conventional grinding type & near creep-feed type plunge cutting type & Traverse cutting type
Principal grinding speed	1,450m/min
Table speed	2−16m/min
Depth of cut	1−30μm/pass(in the conventional type grinding) 50−250μm/pass(in the near creep-feed type grinding)
Cross-feed rate	0.2−3.0mm/pass
Truing	using brake type truier with C80(-170)M wheel Depth of cut : 5−15μm/pass Traverse cutting ype Table speed : 4−10m/min Coolant is injected strongly
Dressing	using WA stick type honing stone(#220−2000) Depth of cut : 2−100μm/pass Plunge cutting type Table speed : 4−6m/min Coolantid injected lightly

다양하게 변화시키며 plunge cutting type과 traverse cutting type의 연삭 가공 실험을 수행하였다. 중요한 연삭 실험 조건 및 트루잉, 드레싱 조건은 Table 2에 나타내 보았다.

연삭 실험의 결과로서 가공 중의 두 연삭 저항 성분 법선 분력(Fn)와 접선 분력(Ft)는 압전 소자형 공구 동력계(3-components piezo-electric type tool dynamometer ; Swiss KISTLER Co., 9257A)와 charge amplifier를, 연삭반의 주축에 부하되어지는 연삭 동력은 digital AC power-meter(Japan YOKOGA WA Co., type 2503)를 사용하여 각각 In-process 방식으로 측정하여 기록계(pen repicorder 3-ch., Japan YOKOGAWA Co., LR4100)를 통하여 기록하고 비교해 보았다. 본 연삭 가공의 실험 시스템의 diagram과 사진을 Fig.1에 나타내 보았다. 그리고 이로 부터 얻은 연삭 저항 성분을 이용하여 비연삭 에너지를 산출하여 비교해 보았다. 한편, 이때 공작물은 접착제와 볼트 등을 이용하여 치구에 장착한 후 동력계 위에 부착하는 방식을 택하였다. 가공 실험후 공작물의 가공면 상태 및 가공 변질층 등을 SEM 촬영하여 비교해 보았으며, 표면 조도를 비접촉식 LASER 3 차원 표면 측정기로 측정해 보았다.



3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연삭 가공 미케니즘

엔지니어링 세라믹스의 연삭 가공 미케니즘을 실험적으로 알아보고자 Si_3N_4, SiC 세라믹스와 WC-Co 공작물에 대한 평면 연삭 가공시의 연삭 궤적을 SEM 촬영하여 Fig.2에 비교해 나타내 보았다. 그림 2는 선단각 120°를 지니는 원추형의 단일 다이아몬드 지립을 부착한 연삭 휠을 제작하여 one pass 방식으로 절입을 가한 경우에 있어서 형성되어지는 각 연삭 궤적을 보여주고 있다. 실제적으론 다이아몬드 연삭 휠의 가공면 상에 무수히 많은 지립이 존재하여 복잡한 연삭 가공면 표면 상태가 장착되어지지만, 단일 인선에 의한 연삭 궤적을 살펴봄으로써 연삭 제거 기구를 유추해볼 수 있다고 생각한다.

그림 Fig.2로 부터 Si_3N_4, SiC 세라믹스의 경우

° using single diamond grain type wheel which has the cornical shape diamond tip with vertical angle 120°
° grinding condition : wheel speed 1695m/min
table speed 10m/min
depth of cut 10μm
down cut type

Fig.2 Comparison of ground trace

모두 연삭 궤적 내에 작은 크랙들이 다수 존재하고 있는 한편, SiC 세라믹스의 경우와는 달리 Si_3N_4 세라믹스의 연삭 궤적은 거의 기하학적인 형상에 가깝고 고경도의 WC-Co나 일반 강재의 연삭 궤적과 거의 유사한 형태를 지님을 알 수 있다. 이와는 달리 동일한 조건하의 SiC 세라믹스의 연삭 궤적은 SiC 세라믹스의 경우와 비교해 상당히 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 연삭 궤적 측면의 주변에 걸쳐 많은 크랙들이 발생되어 있음을 쉽게 찾아볼 수 있다.

그리고 Si_3N_4 세라믹스의 경우보다 연삭 궤적 주변의 재료 부위가 상대적으로 더 많이 마치 부풀어 올라선듯한 상태를 지니고 있음을 단면 형상에 대한 SEM 촬영을 통하여 찾아볼 수 있다. 이 것은 재료 제거 공정에 있어 공작물의 표면층에 다이아몬드 지립이 관입되어질때 재료 구조 매트릭스 상에서 발생되어지는 다양한 크랙들에 기인하는 것이라고 생각된다. 치핑 형성이 이뤄지는 부분을 제외한 나머지 연삭 궤적 측면 전반에 걸쳐 이와 같은 현상이 발생되어져 있음을 관찰할 수 있다. 이와같은 현상은 세라믹스 연삭에 있어 표면 조도를 포함한 가공면 품위에 지대한 영향을 미치는 인자라고 보여진다. 반면에 연삭 궤적의 끝 부분에 있어선 역시 소성 변형이 이뤄져 있음을 찾아볼 수 있다. 이것은 미세 절입량 방식의 세라믹스 연삭 경우엔 연삭 제거 기구가 소성 변형으로 이뤄진다는 것을 보여주는 것이라 하겠다.

연삭 궤적 주변에 있어 연삭 진행과 수직인 방향으로 측면에 발생되어지는 크랙(lateral crack)들은 경취성 세라믹스 재료의 연삭 특성의 주요 인자라고 보여진다. 즉, 실제의 연삭에 있어선 무수히 많은 지립들에 의한 연삭 궤적의 중첩으로 미세 파쇄 현상의 진전에 의한 연삭 제거 기구가 주가 되어 이뤄질 것이며, 결국 엔지니어링 세라믹스의 연삭 가공면 조도는 이러한 재료 제거 기구에 의해 발생되어지는 다양한 크랙 등에 의하여 제한받게 되어진다고 예측해볼 수 있다.

한편, Si_3N_4, SiC 세라믹스간의 이상과 같은 연삭 궤적상의 차이는 파괴 인성치나 탄성 계수와 같은 기계적 특성치에 기인하는 것이라고 생각된다. 결국 Si_3N_4 세라믹스 경우보다 SiC 세라믹스 연삭의 경우 크랙이나 차핑이 발생되어지기 쉽다는 표현을 사용할 수 있다. 따라서 이상의 결과로서 엔지니어링 세라믹스의 고능률적 연삭을 추구하고자 한다면 공작물의 기계적 특성치를 충분히 고려한 연삭 조건을 선정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

3.2 표면 조도

Fig.3은 엔지니어링 세라믹스중 상대적으로 고취성 저경도재라 할 수 있는 Al_2O_3 세라믹스 경우에 대하여 연삭 가공 방향과 직각인 방향으로의 표면 조도 Ra 값을 측정하여 나타내 본 것이다. 본 실험의 범위내에서 표면 조도 Ra 값이 절입량의 변화에 의해 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한, 연삭 가공 방향과 직각인 방향으로의 표면 조도 Ra 값의 차가 나타나지 않음도 알 수 있다. 이러한 결과 역시 고취성재인 Al_2O_3 세라믹스의 연삭 제거 기구가 거의 취성 파괴 모드에 의해 이뤄짐을 보여주는 것이라 하겠다. 그리고 연삭 제거 기구에 있어 수직, 수평 방향으로의 다양한 크랙의 발생이 이뤄지게 되므로 이러한 결과가 나타난다고 할 수 있다.

Fig.4는 Si_3N_4, SiC, Al_2O_3 세라믹스들에 대하여 연삭 가공 방향과 직각인 방향으로의 표면 조도 Rmax, Ra 값들을 측정하여 나타내 본 것이다. 표면 조도 Rmax는 세 가지 공작물에 있어 모두 절입량이 증가할수록 악화되어짐을 알 수 있으며, Al_2O_3 세라믹스에 비해 Si_3N_4, SiC 세라믹스의 경우는 별 뚜렷한 차이없이 상대적으로 적은 폭으로 악화됨을 찾아볼 수 있다. 이는 기계적인 특성치 차에 따른 피삭성과 취성의 정도 차에 의한 연삭 제거 기구의 상대성에 기인되는 것이라고 볼 수 있다. 반면에 표면조도 Ra의 경우는 Fig.3의 경우와 마찬가지로 모든 공작물에 있어 절입량의 변화에 따른 별다른 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 한편 다이아몬드 연삭 휠에 의한 가공 후에 래핑가공에 의한 표면조도 향상 효과를 단일 연삭 가공 기법에 의한 세라믹스 연삭 특성으로 과연 추구해볼 수 있는가에 대해 알아보기 위하

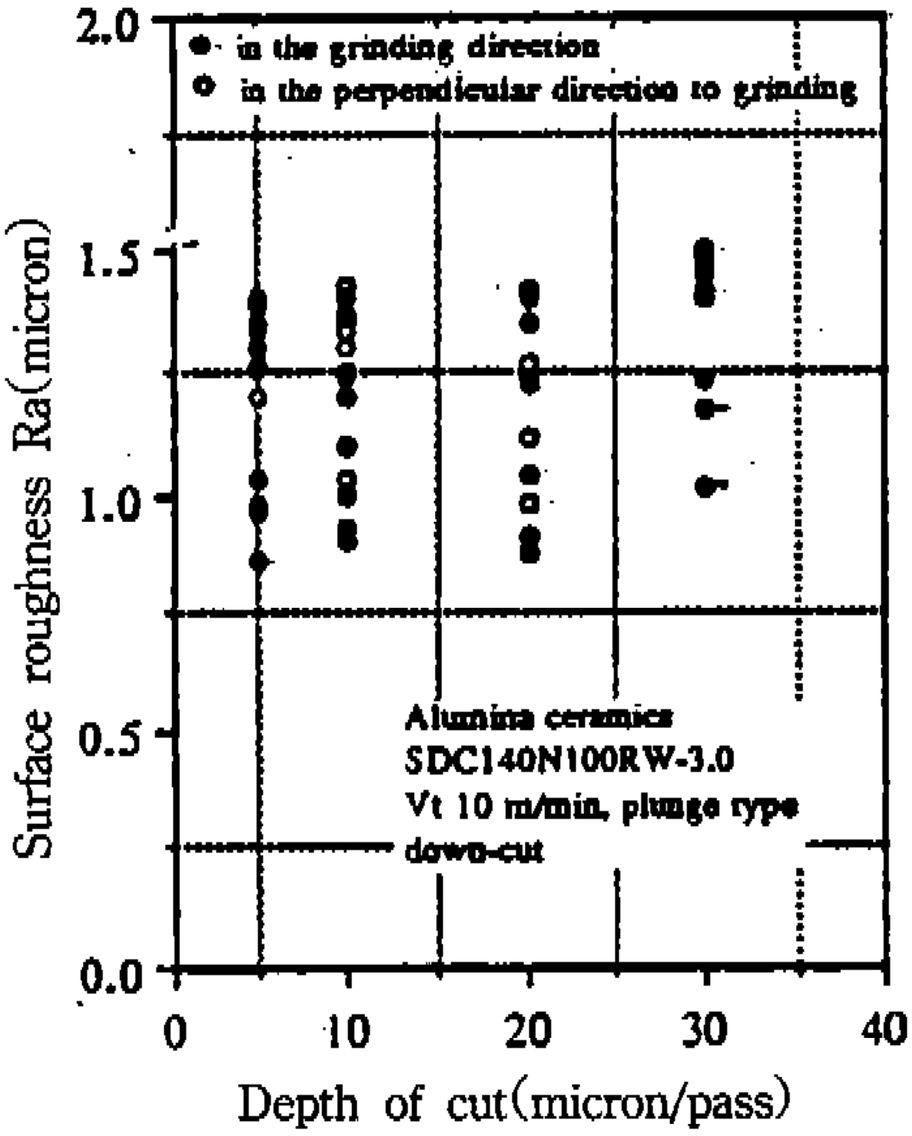
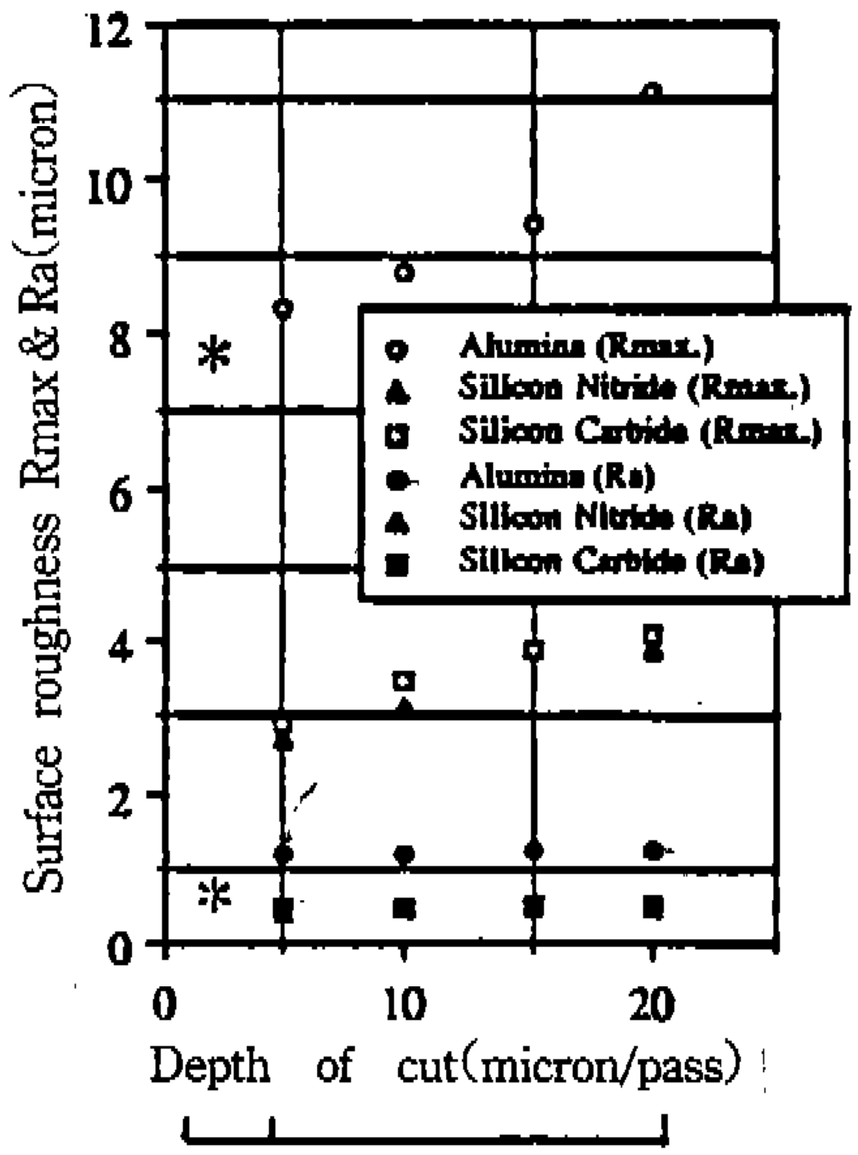


Fig.3 Relationship of between depth of out and surface roughness



WA#60 Diamond wheel #325

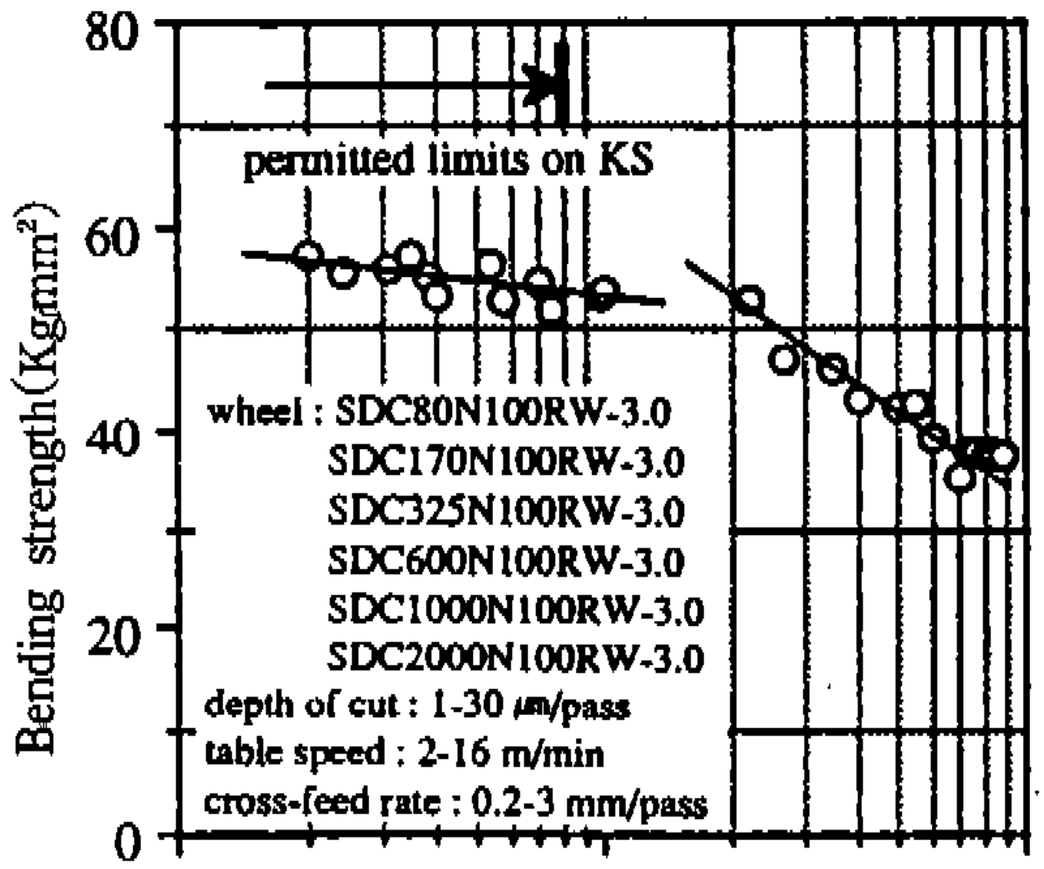
SDC325N100RW-3.0
traverse type, cross-feed 0.75mm/pass
Vt 10m/min
WA60K7V
traverse type, cross-feed 0.2mm/pass
Vt10m/min, depth of cut 2 μ/pass

Fig.4 Effect of depth of cut on the surface roughness

여, 범용 WA 연삭 휠을 사용하여 미세 절입량 방식의 재연삭 가공을 실시해 보았다. 그 결과 Al_2O_3 세라믹스에 비해 Si_3N_4, SiC 세라믹스의 경우 표면조도의 향상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 다이아몬드 연삭 휠에 의한 미소 파쇄형 혹은 전단 소성형 연삭 제거 기구가 이뤄지는 대신 래핑 머신 상에서와 같이 압입 하중에 의한 미세한 억눌림 작용이 미세 절입 방식의 WA 연삭 휠에 의한 가공 작용에 의해 Si_3N_4, SiC 세라믹스의 경우에 있어선 새로운 크랙의 발생이 거의 없이 기존의 다양한 가공면 상의 크랙들이나 가공면 층하의 가공변질층을 효과적으로 제거해줄 수 있기 때문이라고 보여진다. 하지만 이것이 가공면 층하에 존재하는 크랙 발달의 선단을 완전히 제거해줄 수 있는 방법이 되지는 못하므로 가공면 품위 자체가 향상되었다고 단언적으로 말할순 없다고 보여진다.

3.3 연삭 가공 조건과 강도와의 상호 관계

Fig.5는 Si_3N_4 세라믹스를 대상으로 다이아몬드 연삭 휠의 사양과 가공 조건을 다양하게 변화시



- Effect of the surface roughness Rmax on the bending strength
- 3-point bending strength test
- using UTM with attached fixture
- without finishing lapping or polishing machining

Fig.5 Grinding condition and strength

켜가며 연삭 가공한 경우에 있어서의 가공면조도와 굽힘 강도치와의 상호 관계를 나타내 보이고 있다. 굽힘 강도 측정용 시편은 KS L 1591 규격에 준하여 가공 제작하였으며, 만능 재료 시험기에 측정용 치구를 제작하여 부착한 후 KS L 1591 규격에서 제시하고 있는 시험 방법으로 3-point bending strength test한 결과치를 사용하였다. 시험편의 표면조도는 약 Rmax 0.2-8.8μm의 범위를 지니고 있었다.

그림 Fig.5로 부터 굽힘 강도치는 표면조도 약 Rmax 0.9μm 이상이 되어지게 될 경우 현저하게 저하됨을 알 수 있다. 그리고 굽힘 강도치가 약 Rmax 0.4-8.8μm의 범위 내에선 비교적 적은 표준편차를 나타내고 있다. 그러나 이러한 강도치의 경향이 연삭 가공면 조도에만 기인하는 것이라고는 단정하여 말할 수 없다고 생각한다. 표면조도값이 가공면 층하에 발생되어지는 크랙이나 변질층 등을 모두 포함하는 표면 품위를 표현하는 것이 되지는 못하기 때문이다. 따라서 측정한 표면 조도만으로 연삭 가공시편의 강도 특성을 정량적으로 평가한다는 것이 가장 적당한 방법이 되지는 못한다고 생각할 수 있다.

일반적으로 lateral crack은 세라믹스의 연삭성에 주로 관계되고 반면에 median crack은 세라믹스의 가공후 강도치에 관계되어진다고 할 수 있다. 따라서 가공면 조도와 강도와의 관계를 살펴보는 것은 연삭 조건이 세라믹스 연삭 중에 발생되어지는 크랙의 량에 어떠한 영향을 주고 있는가를 간접적으로 판별해볼 수 있는 적당한 방법이라고는 생각된다.

3.4 연삭 저항 및 연삭 동력

Al_2O_3 세라믹스에 대하여 범용 연삭 조건으로 플런지 컷팅 연삭을 실시했을 경우의 법선 및 접선 연삭 저항과 연삭 동력을 Fig.6에 나타내 보았다. 연삭 저항 성분들이 테이블 이송 속도와 절입량이 증가함과 함께 금속재의 연삭 경우와 마찬가지로 점진적으로 서서히 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 평면 연삭의 경우에 있어 테이블 이송 속도와 절입량이 증가하게 되면 연삭 휠의 지립과 공작물의 접촉 면적이 증가하게 된다는 것을 여기서도 잘 보여주고 있는 것이라 하겠다. 또한, 이는 세라믹스 연삭시의 연삭 저항 성분들도 금속재의 경우에 대하여 연삭 저항식을 이론적으로 혹은 실험적으로 구한 식 (1)과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있는 것이라 하겠다.[3,4]

$$F_t = k \cdot t^{\alpha} \cdot V_g^{\beta} \cdot V_t^{\gamma}$$

$$F_n = k' \cdot t^{\alpha'} \cdot V_g^{\beta'} \cdot V_t^{\gamma'} \quad \text{(1-a)}$$

$$F_t = ks \cdot B \cdot t \cdot (V_t / V_g)$$

$$F_n = \lambda \cdot k_s \cdot B \cdot t \cdot (V_t / V_g) \quad \text{(1-b)}$$

여기서, k_s는 각 공작물의 비연삭 저항, k는 각 공작물의 고유 비례 상수, α, β, λ은 각 공작물의 지수값, λ는 법선 연삭 저항 성분(이후 F_n으로 표기)과 접선 연삭 저항 성분(이후 F_t로 표기)의 비, t는 절입량, V_t는 테이블 이송 속도, V_g는 연삭 휠의 주속도, B는 연삭 휠의 폭이다.

약 8μm/pass 이상의 절입량을 가하는 경우에 있어 연삭 저항 성분 F_n의 증가폭이 두드러지게 나타나고 있는 것은 미세 절입량으로 부터 상대적으로 비교적 큰 절입량으로 변화해갈수록 치핑 성형을 위해 소요되어지는 힘 즉, 다이아몬드

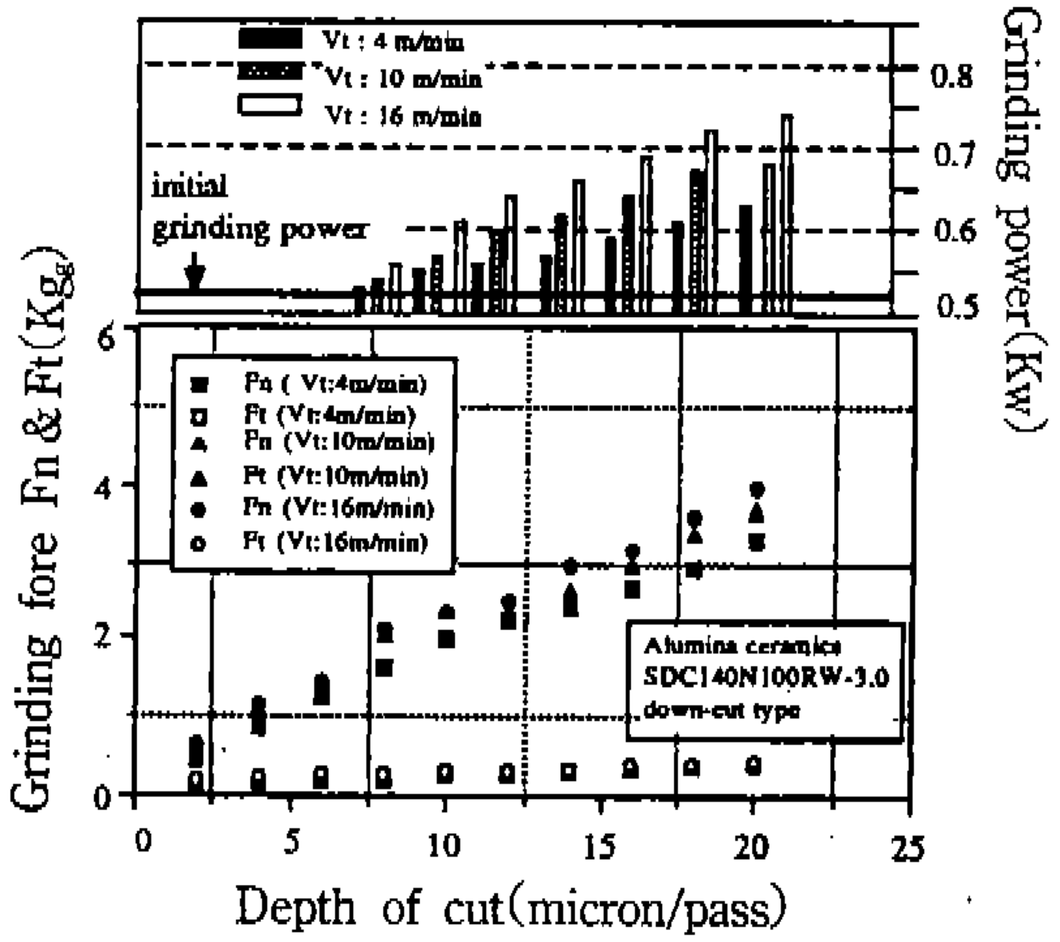


Fig.6 Effects of depth of cut on the grinding force & power

지립의 절인부에 걸리는 압입력이 상당히 커지게 되기 때문이라고 생각된다. 또한, 모든 경우에 있어 F_n값에 비해 F_t 값은 매우 작음을 알 수 있다. 이러한 결과로 부터 연삭 저항 성분비(F_n/F_t)가 금속재의 경우에 비하여 몇 배 더 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 고경도를 지니는 난삭성 공작물의 특성 때문이라고 생각된다.

연삭 동력 역시 비교적 적은 절입량을 가하는 경우엔 공회전시에 걸리는 무부하 동력과 뚜렷한 차이가 나타나지 않다고 약 10μm/pass 이상의 절입량을 가하는 경우에 있어 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 특히 비교적 적은 절입량을 가하는 경우의 경취성 세라믹스 연삭 기구에 있어선 미세 파쇄 현상만이 주를 이루며 연삭 방향으로 연삭 제거가 이뤄지게 되므로 연삭 동력의 소요가 사실상 거의 이뤄지지 않는다는 것을 의미하는 것이라 하겠다. 이러한 결과는 식 (2)와 같이 연삭 동력 P가 연삭 진행 방향으로의 연삭 저항 성분 F_t에 지배받고 있음을 통해서도 잘 알 수 있다.

$$P = F_t \cdot V_g \qquad (2)$$

여기서, F_t는 접선 연삭 저항 성분, V_g는 연삭 휠의 주속도이다.

즉, 연삭 동력이란 금속재의 연삭의 경우와 같이 연삭 제거 진행시에 이뤄지는 전단 소성 변형력에 의해 변화가 주로 이뤄진다고 할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 경취성 세라믹스를 연삭한다면 그 연삭성을 바람직하게 향상시킬 수 있다고 보인다.

Al_2O_3 세라믹스에 대하여 금속재의 고능률화 연삭 기법인 creep-feed 연삭을 실시한 경우에 있어서의 연삭 저항과 연삭 동력을 구하여 범용 연삭의 경우와 비교하여 Fig.7에 같이 나타내 보았다. 그림으로 부터 알 수 있듯이 범용 연삭에 비하여 두 연삭 저항 성분과 연삭 동력 모두 절입량이 증가할수록 큰 폭으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 연삭 제거 기구가 미소 파쇄 현상의 진전보다 전단 소성 변형의 진전에 의해 점차 지배되어져 감을 나타내주는 것이라 하겠다.

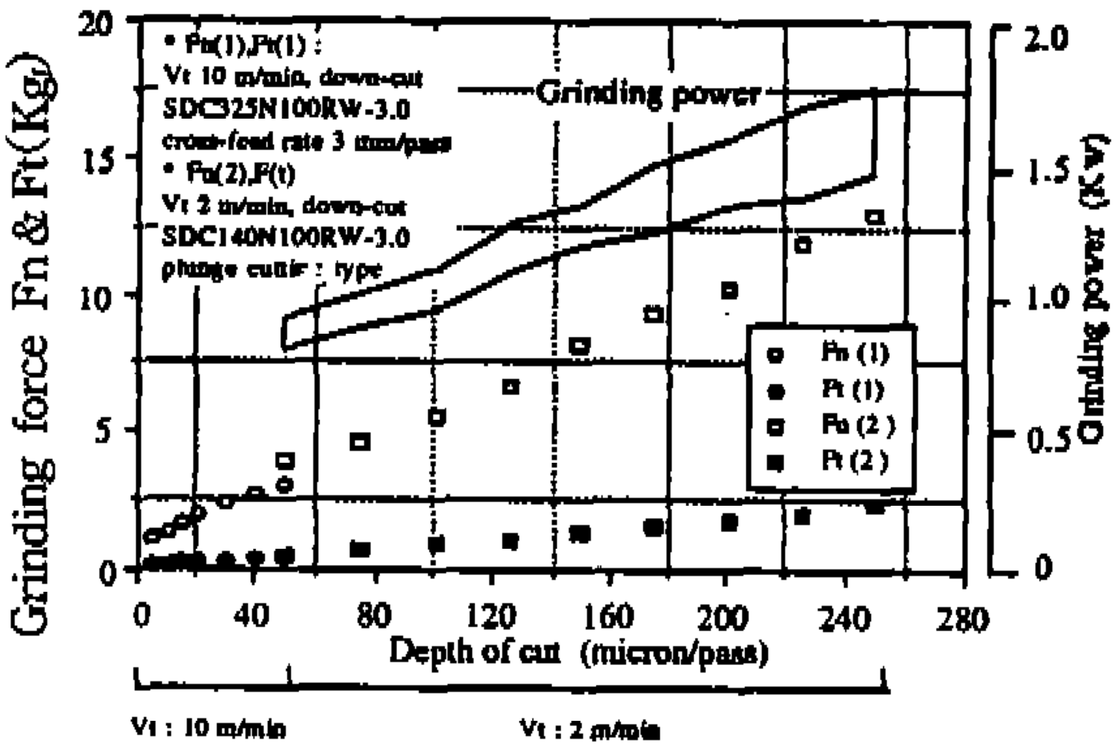


Fig.7 Effects of depth of cut & table speed on the grinding force & power

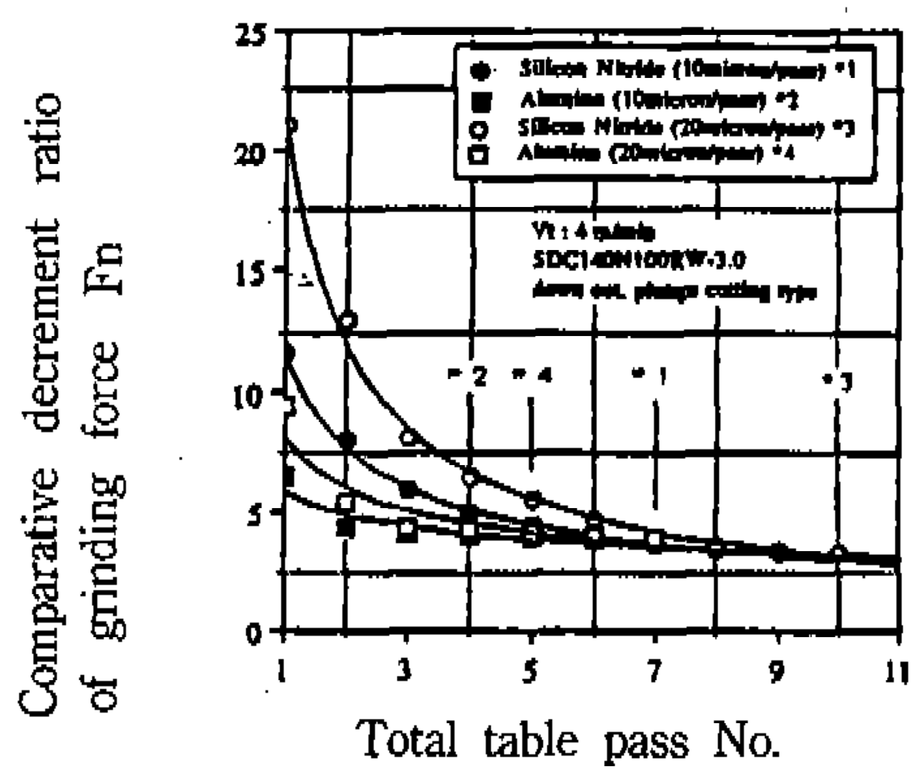


Fig.8 Effect of total table pass No. on the comparative decrement ratio of grinding force (in the case of changing depth of cut)

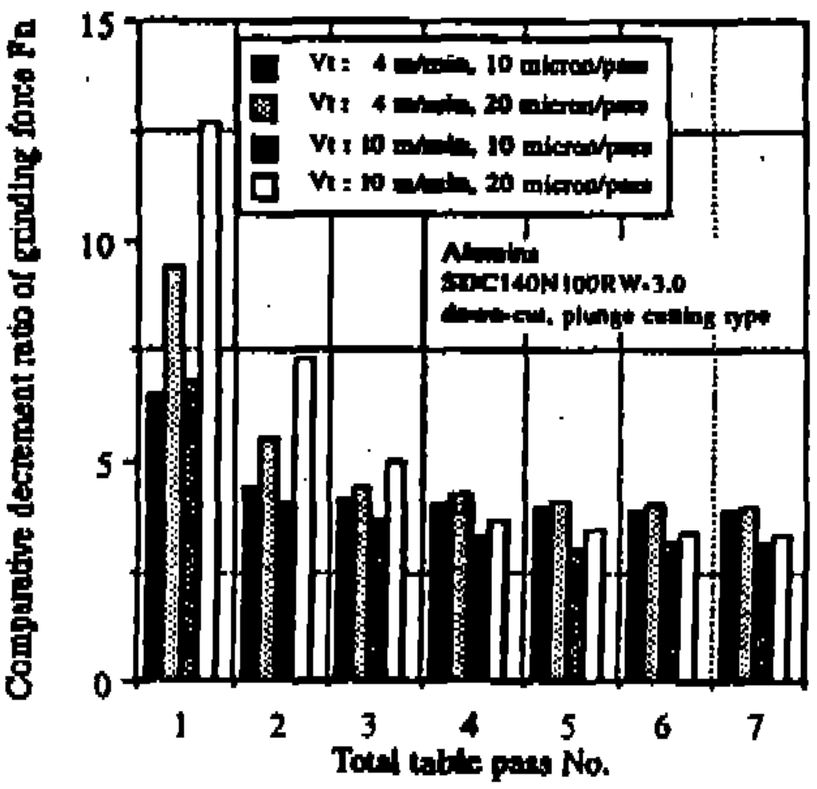


Fig.9 Effect of total table pass No. on the comparative decrement ratio of grinding force (in the case of changing table speed & depth of cut)

또한 범용 연삭반을 사용하여 고경도 엔지니어링 세라믹스의 중연삭 가공을 하고자 할 때는 실험적인 측정법을 활용하여 각 주축 동력 범위 내의 적정한 연삭 조건 범위를 설정하는 것이 바람직하며 고능률적 연삭 가공을 위해선 테이블 고속 이송 방식의 연삭 가공 기법이 더 바람직하다고 볼 수 있다.

3.5 연삭 동적 강성

Fig.8은 Si_3N_4, Al_2O_3의 두 엔지니어링 세라믹스에 대하여 플런지 컷팅 연삭을 실시했을 경우의 스파크 아웃 공정 횟수의 증가에 따른 연삭 저항 성분 Fn의 감소화 과정을 구하여 나타내 본 것이다. 연삭 가공 시스템 상의 연삭 동적 강성에 의하여 가공 잔재량이 존재하게 되고 그 정도의 차는 각 공작물의 기계적 특성치와 연삭 조건에 의하여 영향 받게 된다는 것을 알 수 있는 한편, 테이블 이송 횟수의 증가에 따라 점차 그 잔재량이 소멸되어져 결국에는 완전한 제거가 이뤄져 연삭 저항이 일정하게 되어짐을 알 수 있다.

즉, 그림으로 부터 20μm/pass의 절입량이 처음 가해진 상태에 Si_3N_4 세라믹스의 경우에 Al_2O_3 세라믹스의 경우보다 2.5배 정도 연삭 저항이 크게 나타나고 있다. Si_3N_4 세라믹스의 경우는 약 10회, Al_2O_3 세라믹스의 경우는 약 5회 정도일 때 연삭 저항이 일정하게 되어지는 것을 볼 때, 이는 동일한 조건 하에서 Si_3N_4 세라믹스의 경우 고경도의 공작물과 고탄성의 레진본드계 연삭휠의 상대적인 특성 차 때문에 상대적으로 보다 더 연삭 강성의 크기가 확연하게 나타나는 한편 잔재량의 완벽한 제거를 요하는데 소요되어지는 총 테이블 이송 횟수의 차이도 크게 나타나게 되는 것이라고 생각할 수 있다. 결국 이러한 경향은 Al_2O_3 세라믹스의 경우보다 Si_3N_4 세라믹스의 경우에 더 고능률적인 연삭제거 가공이 용이하지 않다는 것을 보여주는 한편, 동적 강성이 높아지게 될수록 더욱더 스파크 아웃 공정을 완료하기 위한 총 테이블 이송 횟수도 더 많이 요구되어질 수 밖에 없다는 것을 보여주는 것이라 하겠다.

이러한 결과는 Fig.9와 같이 테이블 이송 속도와 절입량을 변화시켜가며 가공하는 경우에 있어서도 찾아볼 수 있으며, 테이블 이송 속도보다 절입량의 조건이 더 큰 영향을 주는 인자라는 것도 알 수 있다. 따라서 설정된 절입량과 실제 절입량의 차이로 인한 문제 등으로 인하여 고정도의 가공을 위해선 Electric Micrometer 등을 이용한 In-Process 측정 기법의 도입이 필요하다는 것을 제안할 수 있다. 한편, 이러한 결과는 다음 식 (3)과도 잘 일치하고 있다.

$$\frac{k_d}{k_s} = \frac{t_{th} - t_p}{t_p} \tag{3}$$

여기서 k_d는 연삭계의 동적 강성, k_s는 연삭반의 정적 강성, t_{th}는 설정된 절입량, t_p는 실제로 이뤄진 절입량을 각각 의미한다.

이 식은 설정된 절입량과 실제로 이뤄진 절입량과의 상호 관계를 평가하는데 유용하게 이용할 수도 있다. 그리고 이 식으로 부터도 연삭 가공 잔재량을 최소화시키기 위해서는 연삭반의 정적 강성을 가능한 한 향상시켜야 한다는 것도 알 수 있다. 즉, 저강성형인 범용 연삭반보다 고강성화를 채택한 고정밀 제어형 전용 연삭반의 활용이 고경도 엔지니어링 세라믹스 부품의 고신뢰형 고정도화 가공을 위하여 필요하다는 표현이 될 수 있다.

3.6 다이아몬드 휠의 마멸

고경도의 엔지니어링 세라믹스를 연삭하는 경우 다이아몬드 지립의 마멸이 상당히 초래되어지게 된다.[5] 연삭 휠의 마멸은 일반적으로 다음 식 (4)와 같이 연삭 휠 부피의 총 손실량으로 계산하여 정량적으로 나타내 볼 수 있다.

$$V_s = \pi \cdot d_s \cdot \Delta r_s \cdot B \tag{4}$$

여기서 Δr_s는 직접 측정한 연삭 휠 반경의 감소량, d_s는 연삭 휠의 마멸이 이뤄지기 전후의 연삭 휠 평균 직경, B는 연삭 휠의 폭을 각각 나타낸다.

하지만 실제의 경우 Δr_s는 연삭 휠의 직경 칫수에 비하여 매우 작은 값에 불과하며, 고신뢰도적으로 정확히 측정하기란 매우 어려운 일이

된다. 따라서 여기서는 연삭 휠의 마멸 상태를 평가하는 간접적인 방법으로 Fig.10과 같이 Si_3N_4, SiC, Al_2O_3 세라믹스 공작물의 제거 체적 누적량과 연삭 저항 성분 Fn 변화와의 관계를 선정하여 실험적으로 조사해 보았다. 이는 다이아몬드 지립의 마멸이 초래되면 연삭 저항이 점차 증가하게 되어지는 현상을 적용해본 것이다. Fig.10으로부터 가공 초기에 높은 연삭 저항 증가 구역이 발생되어지며 그 후 Si_3N_4, SiC 세라믹스의 경우엔 비슷하게 점차 약간씩 연삭 저항이 증가하고 반면에 Al_2O_3 세라믹스의 경우엔 증가폭이 거의 없이 상대적으로 낮은 값으로 일정한 연삭 저항 구역이 지속되어지는 것을 찾아볼 수 있다. 이것은 공작물별 기계적 특성치의 차이에 기인하는 것이라고 볼 수 있으며, 또한 고경도의 엔지니어링 세라믹스를 효율적으로 연삭 가공하기 위해선 가능한한 주의깊게 연삭 가공을 수행하여 초기의 지립 마멸 급증을 구간을 최대한 억제할 필요가 있음을 보여주고 있다. 결국, 이러한 결과는 드레싱 직후 불안정한 연삭 휠 가공면 상태로 고경도 공작물을 가공함에 의해 연삭 초기에 있어 불안정한 마멸 급증 구역이 존재하게 되며, 그 후 정상 연삭 상태가 이뤄지고 있음을 보여주는 것이라 하겠다. 본 실험의 범위내에선 아직 공작물의 총 제거 체적 누적량이 크게 증대하지 않아 지립의 마멸이 극도로 초래되어 연삭 저항이 급격한 기울기를 가지며 현저히 증가하는 상태는 나타나지 않고 있다.[6,7,8] 따라서 아직 재드레싱의 시점은 도달하지 않았다고 할 수 있다.

3.7 비연삭 에너지

Fig.11은 Al_2O_3 세라믹스에 대하여 테이블 이송속도와 절입량의 조건을 다양하게 변화시켜가며 플런지 컷팅 연삭 가공하는 경우에 있어서의 평균 칩 단면적과 비연삭 에너지와의 관계를 나타내 보이고 있다. Al_2O_3 세라믹스는 엔지니어링 세라믹스중에서도 특히 고취성을 지니는 소재로서 거의 전적으로 미소 파쇄 현상에 의한 연삭 제거 기구가 이뤄지므로 평균 칩 단면적으로 표현한다는 것이 다소 무리라고 볼 수 있으나, 지립의 절인과 공작물 표면과의 접촉 상태를 충분히 표현해줄 수 있는 의미가 있다고는 볼 수 있다.

일반적으로 평균 칩 단면적은 다음 식 (5)로서 산출할 수 있다.[9]

$$\frac{a_m}{w^2} = \frac{V_t}{V_g}\sqrt{\frac{t}{D}} \tag{5}$$

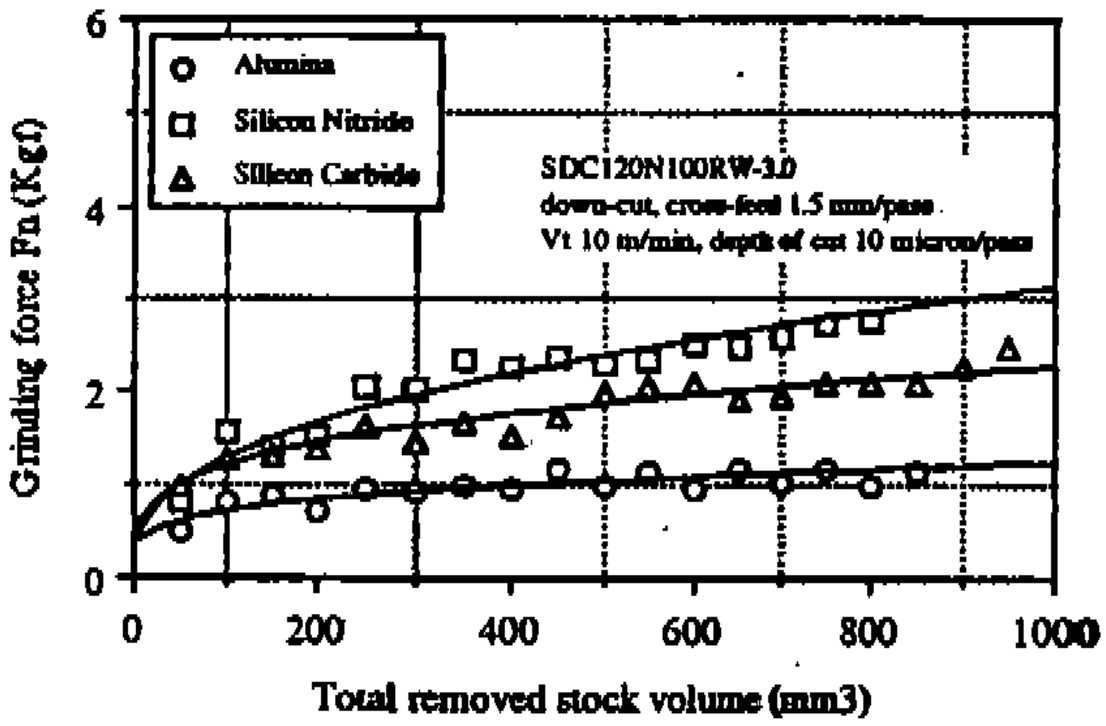


Fig.10 Relationship of between total removed stock volume and increment ratio of grinding force

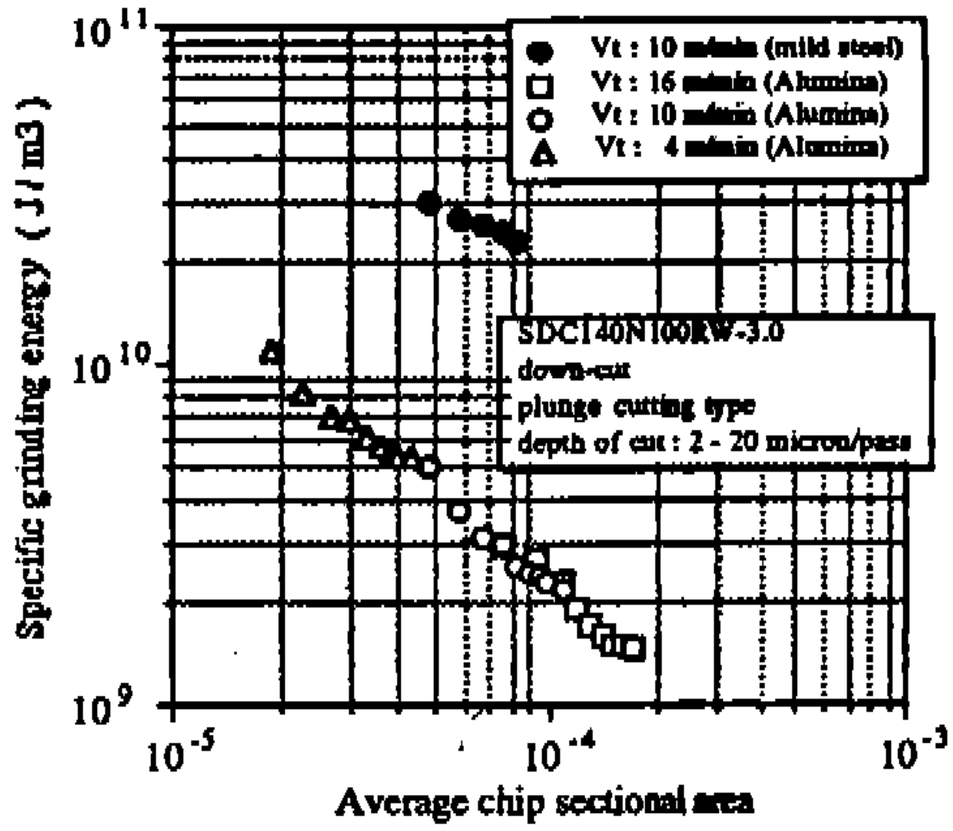


Fig.11 Relationship of specific energy & average chip sectional area

여기서 V_t는 테이블 이송 속도, V_g는 여삭 휠의 주속도, t는 절입량, D는 연삭 휠의 직경, w는 지립간의 평균 거리를 나타낸다.

하지만 지립 간의 평균 거리 w는 사실 측정하기도 곤란하고 불규칙하므로 실제적인 경우 고신뢰도적으로 사용하기란 부적당하므로 여기서는 이를 감안하는 한편 편의를 도모하여 평균 칩 단면적을 무차원수 a_m/w_2을 채택하여 나타내 보았다.

공작물의 피연삭성은 일반적으로 연삭 가공시 치핑을 발생하는데 필요한 일의 량인 비연삭 에너지로서 나타내는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 비연삭 에너지 E_g는 다음의 식 (6)으로서 산출할 수 있다.[10]

$$Eg = \frac{F_t \cdot V_g}{V_t \cdot t \cdot b} \qquad (6)$$

여기서, F_t는 접선 방향의 연삭 저항 성분값, V_g는 연삭 휠의 주속도, V_t는 테이블 이송속도, t는 절입량, B는 연삭 휠의 폭이다.

Fig.11로 부터 본 실험의 조건 번위에선 비연삭 에너지가 a_m/w^2값이 증가할수록 Al_2O_3 세라믹스와 연강재의 경우 모두 감소하는 추세를 나타내고 있으며 상대적으로 Al_2O_3 세라믹스의 경우에 그 감소 폭이 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 그리고 동일한 범용 연삭 가공 조건 범위내에서 Al_2O_3 세라믹스의 경우에 연강재의 경우보다 비연삭 에너지가 더 적게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 재료의 연삭 제거 기구가 미소 파쇄형에 의한 것과 전단 소형 변형에 의한 것의 차이에 기인하는 것이라고 생각되어진다. 즉, 금속재료의 연삭 경우는 그 재료 제거 기구가 전적으로 소성 변형에 의해 이뤄지게 되므로 높은 비연삭에너지가 소요되는 것이라 하겠다. 또한, Al_2O_3 세라믹스 경우의 비연삭 에너지는 테이블 이송 속도와 절입량이 증가할수록 감소하며, 절입량의 조건보다 테이블 이송 속도의 조건에 더 큰 영향을 받고 있음을 그림으로 부터 찾아볼 수 있다. 이것은 세라믹스의 평면 연삭에 있어 테이블 이송 속도가 연삭성에 더 큰 영향을 주는 주요한 인자라는 것을 보여주는 것이라 하겠다.

4. 결 론

범용 연삭반 상에서 다이아몬드 연삭 휠을 사용한 대표적인 엔지니어링 세라믹스의 평면 연삭 가공 실험을 수행함으로써 다양한 연삭 특성을 살펴볼 수 있었으며, 실험적인 연구의 결과를 통하여 다음과 같은 몇가지 사항들의 주요한 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 세라믹스의 연삭 제거 기구는 미소 파쇄형 모드가 주를 이루는 한편, 미세 절입량 방식의 가공에 있어서는 소성 변형 방식의 모드도 관찰되어진다. 연삭 궤적 주변의 크랙 발달 정도는 소재의 파괴 인성치 및 탄성 계수 등의 기계적 특성치에 지배받는다.
2) 취성이 높고 경도가 낮을수록 범용 연삭 조건하에서 세라믹스의 연삭 가공면 조도는 절입량 등의 가공 조건에 거의 영향을 받지 않고 일정하다.
3) 세라믹스 연삭 가공면 조도와 강도와의 관계를 살펴봄으로써 크랙의 정도에 미치는 연삭 조건의 영향을 간접적으로 평가해 볼 수 있다.
4) 세라믹스의 중절입량을 가하는 준 Creep-Feed 연삭 방식을 실행할 경우는 실험적인 측정법을 통하여 연삭반 주축 동력 범위내의 적정한 가공 조건을 설정하는 것이 바람직하며, 고능률적 연삭 가공을 위해선 고속 테이블 이송 방식의 연삭 기법 채택이 바람직하다.
5) 세라믹스의 기계적 특성치에 따라 동적 연삭 강성이 다르게 되므로 가공 잔재량을 충분히 제거하기 위한 스파크 아웃 횟수도 적정히 설정해야 한다. 고정도의 칫수 정도 창출을 위한 연삭시는 In-Process 방식의 측정 기법이 필요하며, 가공 잔재량을 최소화 하기 위해선 연삭 시스템의 정적 강도를 충분히 향상시켜야 한다.
6) 세라믹스의 고효율적 연삭 가공을 위해선 연삭 가공 초기의 다이아몬드 지립 마멸급증 구간을 최대한 억제시켜 초기 드레싱 효과를 지속시켜줄 필요가 있다.

7) 경취성 세라믹스의 비연삭 에너지는 미소 파쇄형 제거 기구의 특성으로 인하여 오히려 강재에 비하여 낮게 소요되며, 절입량보다 테이블 이송 속도가 더 큰 영향을 주는 가공 인자가 된다.

참 고 문 헌

1. W.D.Kingrey, H.K.Brown and D.R.Uhlman, Introduction to Ceramics, Second Edition, John Wiley & Sons, 1975.
2. S.D.Jang, Present Status and Prospect of New Ceramicsin Korea, Proceedings of the First Korea Japan Seminar on New Ceramics, 1984, p.13－23
3. G.Werner, Influence of Work Material on Grinding Forces, Published in the CIRP Annals, Vol.27, No.26, 1978, p.243－248
4. Ono, K., Analysis on the Grinding Force, Bulletin of the Japan Society of Grinding Engineers, No.1, 1961.
5. J.L.Metzger, Super-abrasive Grinding, Butterworths, London, 1986, Chapter 12.
6. Soneys.R., Wang, L.C., Analysis of the Static and Dynamic Stiffness of the Grinding Wheel Surface, Advances in Machine Tools Design and Research, Pergamon Press, 1968.
7. G.Werner, Relation between Grinding Work and Wheel Wear in Plunge Grinding, Technical Paper MR 75－610, Society of Manufacturing Engineers(SME), Dearbon, 1975.
8. Barker, W.R and Krabacher, E.J., New Techniques in Metal-cutting Research, Trans. ASME, 78, 1956, p.149
9. S.Malkin, Grinding Technology-Theory and Application of Machining with Abrasives, John Wiley & Sons, 1989.
10. Malkun, S.and COOK, N.H., Specific Energy and mechanisms in Abrasive Processes, Proceedings of Third North American Metalworking Research Conference, Carnegie Press, 1975, p.453