

뉴 세라믹스의 연삭성에 관한 연구

김성겸*, 김남훈⁺

(논문접수일 2007. 2. 9, 심사완료일 2007. 3. 27)

A Study on the Grindability of New Ceramics

Seong Kyeum Kim*, Nam Hoon Kim⁺

Abstract

The number of parts made of ceramic materials has gradually been increasing in field of from mechanical engineering to electronics engineering and, mechanical engineering ceramics have spread because of three very favourable characteristic features of their application, namely, heat, wear, and corrosion resistance. therefore, the elaboration of suitable grinding technologies is important. grinding is problematic because crack -free ceramics are difficult to process owing to their particular micro structure. In this paper we report on the application of advanced precision grinding process, elaborating continuous wheel dressing. The removal rate can be increased significantly and surface roughness is improved. Various problems(roughness, ground surface etc)encountered in grinding of ceramics are also discussed.

Key Words : Grindability(연삭성), Surface Roughness(표면거칠기), Depth of Cut(연삭깊이), Plastic Mode(소성모드), Crack Mode(크랙모드), SEM(주사선 전자현미경), EDS(에너지 디스퍼시브 x-레이 스펙트로스코피:성분분석기)

1. 서론

대부분의 세라믹스 재료는 기계분야에서 다른 산업분야까지 널리 사용된다. 특히, 이와 같은 소재를 고급 세라믹스라 하여 기존의 세라믹스와는 아주 다르다. 기계용 세라믹스는 기계적인 특성 때문에 주로 열, 마모, 부식저항 등이 요구되는 부품에 사용된다. 한 예로는 2000℃의 고온에서도 안전하게 견딜 수 있는 가스 터빈용 부품과 과도한 마모 저항이

필요한 베어링 또는 패키징재료로 사용되는 고급 세라믹스가 있다. 우리나라에서도 기계재료와 전자재료(자성, 기억소자 등)로 사용되는 연간 세라믹스의 부품만 해도 전 년도에 비해 약 15% 정도 증가하고 있는 추세이다.

이러한 세라믹스의 특성과 다양한 용도에도 불구하고 세라믹스가 가진 높은 강성과 경도 특성 때문에 연삭을 하더라도 기계가공성이 좋지 않고 고품질의 표면이나 양질의 연삭 부품을 얻기가 어렵다. 지금까지 세라믹스의 연삭에 관한 연

* 공주대학교 공과대학 기계자동차공학부 (skkim@kongju.ac.kr)

주소: 330-220 충남 천안시 부대동 275

+ 공주대학교 공과대학 기계자동차공학부

구로는 이 재료의 경취(硬脆)한 특성 때문에 크랙^(1,2), 분쇄^(3,4), 및 한정된 손상⁽⁵⁾을 남긴다는 연구와 연삭한 표면에는 잔류응력이 존재하여 세라믹스의 부품의 강도를 저하시키는 원인이 된다는 연구보고가 있다. 그러나 연삭한 표면의 검사방법은 아직까지 확립되어 있지 않기 때문에 SEM이나 표면 윤곽 검사에 의해 손상된 표면을 측정하거나 관찰하는 경우가 보통이다^(6,7).

따라서 본 연구는 각종 세라믹스를 연삭 시험하여 연성모드와 파괴기구(취성모드), 작용하중, 잔류응력에 의한 크랙, 표면 품질 및 표면 거칠기를 조사하여 세라믹스 연삭의 특성을 조사 또는 분석하고 관찰하였다.

2. 취성재료의 연삭

2.1 연성모드

연성모드는 연삭을 하기위해 공구인 연삭숫돌과 피삭재와의 실제 간섭량을 연성 취성의 천이점에 따라 임계 연삭 깊이 이하로 제어한다면 실현이 가능하다. 이를 위해 매우 작은 연삭 숫돌을 사용하거나 작용하는 숫돌 입자수를 증가시키고 각 숫돌의 연삭 깊이를 미소화한다면 취성재료라도 경면 연삭이 가능할 것이다.

그러나 미세 숫돌을 사용하는 경우에 가공 중에 숫돌입자의 탈락이 불가피하거나 절삭 날의 위치를 변화시키므로 숫돌 형상에 따른 가공 오차가 생긴다. 특히, 탄성계수가 적은 레지노이드 결합제를 사용하는 경우에 숫돌에 절삭력이 작용하면 결합제가 탄성 변형하여 연삭 깊이가 작게 되므로 비교적 연성모드의 가공 면을 얻을 수 있다. 또 연삭가공에서 이상적인 운동에 의한 연성 모드를 실현하거나 가공 시에 숫돌 입자의 탈락과 결합제의 탄성 변형을 억제할 필요가 있다.

2.2 재료 제거시의 취성모드

Fig. 1에서 노치부의 아래에 소성변형 영역이 존재하고, 이에 따른 크랙 시스템에서는 반경 크랙과 측면 크랙이 있다(그림에서 b, a는 좌우 소성영역의 범위이고 d, c는 좌우 크랙의 길이와 취성영역의 범위). 이러한 크랙은 재료의 비균질 변형에 의한 잔류응력이 탄소소성변형을 일으키기 때문에 생긴다. 반경 크랙은 하중이 작용할 때, 썩기 작용에 의해 발생하여, 하중이 제거되면 크랙 끝의 인장 잔류 응력으로 쉽게 진전된다. 측면 크랙은 썩기 하중이 제거될 때, 처음 발생하기 시작하여 내부에 잔류하는 잔류응력에 의해 크랙으로 진전한다. 그리고 위에서 설명한 크랙들은 모두 잔류 응력장에 의해 발생하지만, 주로 반경 크랙은 재료의 강도를 저하시키고 측면

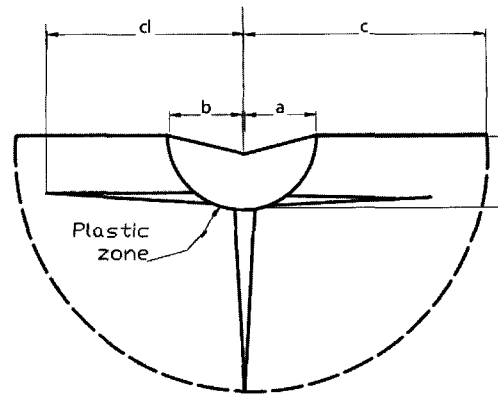


Fig. 1 Plastic zone and cracks propagation

크랙은 재료가 제거됨에 따라 마모나 부식의 원인이 된다고 생각된다. 반경 크랙은 하중이 작용 유무와 관계없이 압입자 밑의 소성변형에 의해 발생하나 측면 크랙은 하중이 작용하지 않을 때에도 발생한다는 점이 약간 다르다.

비균질 소성변형에는 잔류응력이 존재하므로 두 종류의 크랙에 대하여 잔류응력의 영향을 조사해보는 것도 좋은 방법이다. 첫째, 반경 크랙은 탄성과 잔류 응력성분에 의해 두 가지 형태로 진전된다. 그러므로 탄성성분은 반경 크랙을 일으키고 하중이 작용할 동안 아래로 확장되지만 잔류 응력성분은 압입 하중이 제거되어도 연속적인 크랙을 발생시키는 요인이 된다.

3. 실험방법

3.1 연삭조건 및 실험방법

정밀한 주축을 가진 정밀 표면 연삭기로 평면연삭 시험하였고, 연삭속도는 500~20,000rpm이며, 0.1 μ m의 위치 해상도를 가진 선형 엔코더로 숫돌의 연삭 깊이를 제어하면서 시험하였다. 시험에 사용한 숫돌은 입자가 서로 다른 다이아몬드 휠인 SD140, SD400 및 SD2000이고 평균 숫돌의 입자는 40~220 μ m이며 결합제는 메탈본드 또는 레지노이드이다. 한편, 숫돌의 크기는 외경 150~200mm, 다이아몬드가 2mm정도 코팅된 것으로 전체 두께는 10mm정도이다.

시험에 사용한 연삭 조건은 휠 표면의 주속도(V) 500~12000m/min 피삭재의 이송속도(v) 50~700m/min, 연삭 깊이(t) 0.1~700 μ m이고 연삭 폭(B)은 5mm이다. 대부분의 연삭실험은 건식으로 연삭하였다. 또, 트루잉은 컵형 다이아몬드 숫돌인 SD140-P100M-30으로 하고 드레싱은 알루미늄 스틱

(WA150G10V)을 사용하였다. 연삭의 표면 품질에 관한 정보를 얻기 위해, 차례로 래핑, 예칭 및 페이퍼 폴리싱하여 광학, 주사형 전자 현미경(SEM)과 EDS로 피삭재의 표면을 관찰하거나 피삭재의 표면 성분을 분석하였다. 그리고 연삭 조건은 Table 1, 사용재료인 세라믹스의 특성은 Table 2, 측정 장치의 측정 범위는 Table 3과 같다.

Table 1 The cutting condition in grinding test

Conditions	Value
Wheel speed(V)	500~12000m/min
Feed rate(v)	50~700m/min
Depth of cut(t)	0.1~700 μ m
width of material	5mm
Fluid	Dry

Table 2 Physical properties of ceramic materials

Materials & Properties	Silicon nitride	Alumina	Silicon carbide	Zirconia (ZrO ₂)
Composition	Si ₃ N ₄ 91% Y ₂ O ₃ 8% Al ₂ O ₃ 1%	Purity 99.5% 90.5%		
Density(g/cm ³)	3.28	3.94	3.15	6.05
Grain size(μ m)	2-3	2-3	5	5
Vickers hardness(Gpa)	17.9	18.3	31.0	12.3
Flexure strength (Mpa)	800	500	490	1100
Fracture strength (MN/min ^{3/2})	6.6	5.3	3.6	7.7
Brittleness(H _v)	1400	1650	1100	1300

Table 3 The dimension of measuring instrument in grinding test

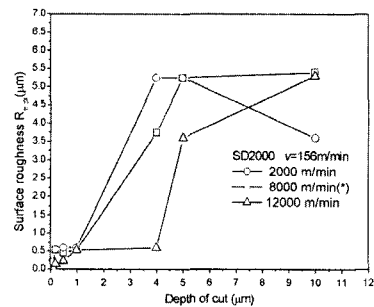
Instrument	The range of measure
surface grinding M(YGS137A)	Table size 1250X600
Tool dynamometer(Dyno Ware : Type 2825A)	Load 0~5,000 newton
Surface roughness tester(SJ-301)	Measuring range 350 μ m
SEM(LSL-DS_130)	Magnification 20~450,000

4. 실험 및 고찰

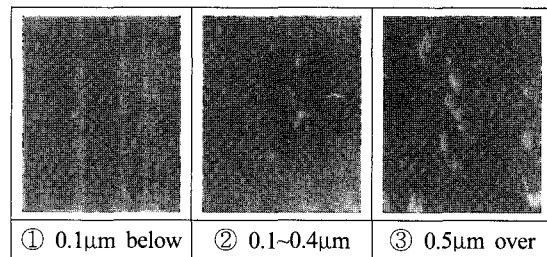
4.1 연성모드 연삭의 가능성

Fig. 2는 슛돌폭 정도의 홈 가공할 때, 연삭 깊이와 표면 거칠기의 관계이다. 연삭시험은 메탈본드 (SD2000) 슛돌로 이송속도를 1mm/min, 휠의 주속도를 2000, 8000, 12000 mm/min으로 변화시켰다. Fig. 2(a)는 연삭 깊이와 표면 거칠기의 관계이고 표시된 실험값은 3번씩 반복하여 평균한 것이다. 연삭 깊이 약 1~5 μ m범위에서 휠의 주속도에 관계없이 표면 거칠기가 크게 상승한다. 즉, 연삭 깊이가 클수록 취성 파괴된 가공 면이 여러 곳에 나타나기 시작하여 표면 거칠기가 증가하는 것이다. 특히, 주속도 2000m/min, 연삭 깊이 5~7 μ m에서는 표면 거칠기는 거의 일정한 값(약 5 μ m)으로 안정된다. 이것은 휠의 주속도, 이송속도 및 연삭 깊이가 가장 알맞은 조건에서 연삭했기 때문이라고 생각된다. 그리고 주속도가 8000m/min인 경우도 연삭 깊이 1 μ m이상에서 표면 거칠기는 증가하다가 5 μ m이상에서는 안정된다.

그러나 12000m/min인 경우는 연삭 깊이 약 1~4 μ m까지의 표면 거칠기가 양호하지만 4~5 μ m부터 증가하기 시작하여



(a) Surface roughness VS. depth of cut



(b) Ground surface of ceramics(Al₂O₃)

Fig. 2 Surface roughness, Ground surface vs Depth of cut

5~7 μm 에서는 다소 경사가 완만해 진다.

Fig. 2(b)는 연삭 깊이($V=8000\text{m}/\text{min}$, $v=156\text{m}/\text{min}$, $t=1\mu\text{m}$ 이하)에 따른 ①,②,③ 3단계의 변화의 과정에서 표면 거칠기의 견본을 추출한 것이다. Fig. 2(b)는 ①,②,③의 각 위치에서 광학현미경으로 본 표면의 사진이다. 연삭면의 상태는 연삭 깊이가 0.1 μm 이하는 연성모드라고 생각되는 표면(①)이 존재한다. 반면에 취성모드로 생각되는 ③의 면은 곳곳에 파괴된 자국이 생긴다. 한편, ②의 사진은 연성과 취성이 혼합된 상태로 보이는 연삭 면이 관찰되므로 위와 같은 3개의 모드로 구별할 수 있다.

특히, 3면 중에서 ①의 연삭 면은 표면이 매끈한 연성모드로 연삭된 것이라고 생각된다(Fig. 1의 소성영역<연성모드>과 크랙 진전영역<취성모드> 참조). 따라서 세라믹스의 연삭에서 일정 깊이와 적절한 연삭속도를 선택하면 연성모드에서도 연삭이 가능할 것이다.

4.2 연삭저항의 측정

연삭저항이 큰 조건에서 가공하면 미소 부품이 파괴되기 쉽다. 그러므로 작은 부품일수록 연삭가공을 하기위해 되도록 연삭저항이 작아야 한다. 따라서 Fig. 3은 슛들의 축 방향에 이송이 걸리지 않는 평면 연삭에서 슛들에 생기는 저항을 측정하였고 작은 부품의 연삭에 적절한 연삭조건을 사용하였다. 연삭저항은 슛들의 원통 면에 접선방향으로 발생하는 힘과 법선 방향의 힘의 2방향으로 분해하여 표시하였다. 그리고 5mm 폭의 피삭재(알루미늄)를 4 종류의 이송 속도로 평면연삭 가공할 때의 슛들의 부하 토크에서 접선방향의 저항을 산출하여 비교 검토하였다. 그 결과, 슛들의 주속도(2000 m/min)에서 연삭 깊이를 5, 10, 20, 50 μm 공작물의 이송 속도를 90, 156, 312, 630 m/min 로 변화시켜서 측정한 연삭저항을 그림으로 표시하였다. 이와 같이 같은 휠의 주속도

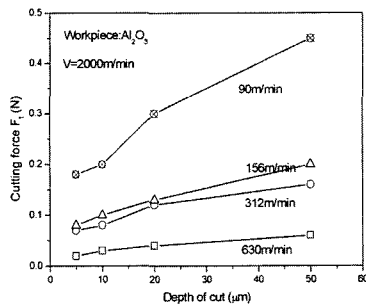


Fig. 3 Grinding force VS. depth of cut

에서 연삭 깊이가 깊을수록 또 이송속도가 작을수록 표면 거칠기는 악화되는 것을 알 수 있다.

그러나 이송속도 90 m/min 에서는 연삭 깊이가 증가하면 연삭저항은 급격하게 상승한다.

4.3 표면 거칠기

각종 세라믹스(Al_2O_3 , SiC , ZrO_2 , Si_3N_4)를 연삭할 때, 연삭 깊이가 표면 거칠기에 미치는 영향을 표시한 것이 Fig. 4이다. 어떤 재료라도 최대 표면 거칠기(R_{max})는 연삭 깊이가 작은 범위에서는 양호하다.

그리고 위의 그림에서 세라믹스의 종류에 따라 표면 거칠기가 각각 다르게 나타난다. 즉, Al_2O_3 의 표면 거칠기가 가장 나쁘고, 다음에는 SiC , Si_3N_4 순서이며 ZrO_2 의 표면 거칠기가 가장 좋게 나타나고 있다. Si_3N_4 보다 ZrO_2 가 표면 거칠기가 좋은 이유는 연성 모드에 의한 전자(Si_3N_4)의 부풀어 오름이 후자(ZrO_2)보다 크기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5는 입도가 #140(세밀)인 슛들을 사용하여 SiC 를 연삭하는 경우에 연삭 깊이와 표면 거칠기(R_{max})의 관계이다.

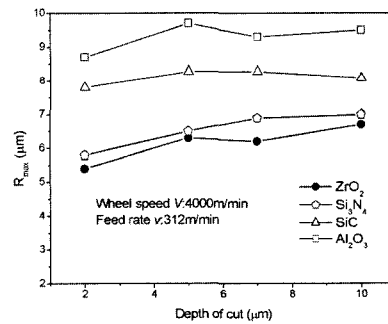


Fig. 4 Relation between surface roughness and Depth of cut

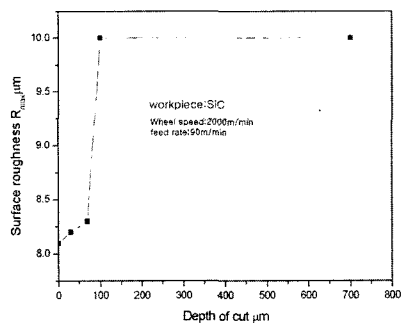


Fig. 5 Effect of depth of cut on surface roughness

그림에서 표면 거칠기(R_{max})는 연삭 깊이 $100\mu m$ 이하에서는 단순하게 증가를 하지만 이 이상의 연삭 깊이에는 거의 일정하다. 즉, 연삭 깊이 $100\sim 700\mu m$ 범위에서 표면 거칠기(R_{max})는 약 $10\mu m$ 로 일정한 값을 나타낸다. 세라믹스의 연삭에서도 연삭저항은 이송속도(v), 연삭 깊이(t) 적(積)과 주속도(V) [$t \cdot v / V$]에 반 비례한다고 한다⁽⁴⁾. 그러므로 주속도 $2000m/min$ 과 이송속도 $90m/min$ 에서 연삭 깊이가 증가 할수록 위의 수식에 의해 연삭저항이 커지고 미세 크랙으로 가공되기 때문에 일정 범위의 연삭 깊이는 표면 거칠기에 큰 영향을 주지 않는다고 생각한다. 그리고 연삭 후의 스톨의 마모 상태를 육안으로 관찰할 때, 일부분이 원호 모양으로 마모되어 있었다.

4.4 가공면의 표면상태

보통 세라믹스는 쾌삭 세라믹스와 달리 경도가 매우 크기 때문에 주로 연삭으로 가공한다. 연삭시에 다이아몬드 스톨이 세라믹스와 접촉하면 가공 면에는 크랙이 생기고 스톨이 통과한 후라도 표면에서 응력이 개방하여 균열로 진행된다. 이에 따라 연삭이 진행된 가공 면에는 분쇄된 분말상의 세라믹스 칩을 배출한다. 그러나 연삭에서 연삭 깊이를 잘 조정하면 연삭모드가 되면서 연강을 연삭하듯이 가공할 수 있고 또한 아름다운 면을 얻을 수 있다. 이것을 조사하기 위하여 각종 세라믹스의 가공면을 나타낸 사진(Fig. 6)이다. 즉, 휠의 주속도(V)를 $2000m/min$, 이송속도(v) $300m/min$ 의 연삭 조건과 연삭 깊이(t)를 각각 $100\mu m$ 와 $2\mu m$ 로 변화시켜서 표면

상태를 SEM으로 찍은 사진이다.

Fig. 6은 지르코니아(ZrO_2), 산화알루미나(Al_2O_3)를 건식 연삭하여 연마한 면과 연삭한 면을 비교한 것이다. 건식 연마(래핑)면은 대부분이 평활한 면이 나타나지만 연삭면은 작은 요철(凹凸)이 나타나고 있다. 전자의 연삭면은 연삭 깊이($100\mu m$)가 약간 크므로 심하게 마모되어 있으나 후자는 연삭 깊이($2\mu m$)로 비교적 작기 때문에 연삭면이 아름답다. ZrO_2 의 연삭상태는 취성모드에 가깝고 작은 파괴 흔적이 관찰되지만 Al_2O_3 의 연삭면은 아름답고 마모 흔적도 거의 나타나지 않는다. 따라서 약간의 연삭모드로 볼 수 있는 연삭 흔적과 취성모드라고 생각되는 연삭 흔적이 함께 나타나므로 연삭과 취성이 혼재한 연삭기구로 판단된다. 여기에서 Al_2O_3 의 취성적인 파괴가 크게 나타나지 않는 것은 연삭 깊이가 아주 작은 연삭조건에서 연삭했거나 피삭재의 특성에 따른 현상으로 생각할 수 있다.

Fig. 7은 지르코니아(ZrO_2), 산화알루미나(Al_2O_3)의 성분을 EDS로 분석하였다. 따라서 전자(ZrO_2)는 Zr, C, O성분이 많고 후자(Al_2O_3)는 Al, Si, C, O로 구성되어 있다.

5. 결론

세라믹스(질화규소, 탄화규소, 지르코니아, 알루미나 등)을 연삭 실험하여 연삭모드와 파괴모드, 표면 거칠기 및 표면 품질을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지르코니아(ZrO_2), 산화알루미나(Al_2O_3)를 휠의 주속도

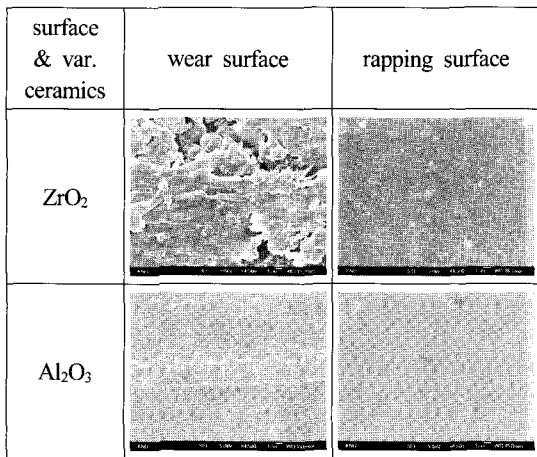


Fig. 6 Micrographics and SEM of surface ground formed in dry various ceramics grinding

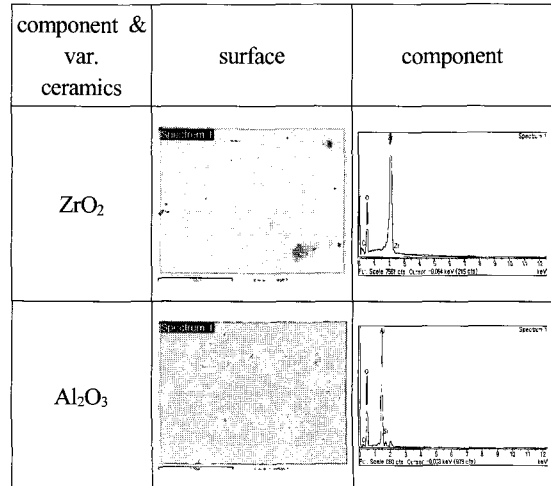


Fig. 7 The results of EDS analysis with various ceramics

2000m/min 이송속도 312m/min으로 건식 연삭하여 연마한 면과 연삭한 면을 비교한 결과, 건식 연마(래핑) 면은 대부분이 평활한 면이 나타나지만 연삭 면에는 작은 요철(凹凸)이 나타나고 있다.

- (2) 산화 알루미늄(Al_2O_3)의 경우에 휠의 주속도(2000m/min)가 같을 지라도 연삭 깊이가 깊을수록 이송속도(v)가 작을수록 연삭저항은 증가한다. 특히 이송속도(v) 90m/min에서 연삭 깊이에 따른 연삭저항은 큰 기울기를 가지고 변화한다.
- (3) 세라믹스(Al_2O_3)를 휠의 주속도 8000m/min, 이송속도 156m/min, 연삭 깊이(t) $1\mu m$ 이하로 연삭할 때, 연삭 깊이가 $0.1\mu m$ 이하에서는 연성모드, $0.1\sim 0.4\mu m$ 는 혼합모드 $0.5\sim 1\mu m$ 에서는 취성모드로 보이는 현상이 관찰된다.
- (4) 각종 세라믹스를 휠의 주속도 4000m/min, 이송속도 312m/min으로 연삭할 때, Al_2O_3 의 표면 거칠기가 가장 나쁘고, 다음에는 SiC, Si_3N_4 순서이며 ZrO_2 의 표면 거칠기가 가장 좋게 나타나고 있다.

후 기

이 논문은 공주대학교의 자체학술연구비 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) Koepke, B. G. and Strokes, R. J., 1970, "A study of grinding damage in magnesium oxide single crystals," *J. Mater. Sci.*, Vol. 5, pp. 240~247.
- (2) Kirchner, H. P., 1984, "Damage penetration at elongated machining grooves in hot pressed Si_3N_4 ," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 67/5, pp. 127~132.
- (3) Conway, J. C. and Kircher, H. P., 1986, "Crack branching as a mechanism of crushing during grinding," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 69, pp. 603~607.
- (4) Zhang, B., 1993, "Precision grinding regime of advanced ceramics," in: *Proceedings of the 1993 Annual Meeting of American Society of Precision Engineering*, Seattle, Washington, DC. November 7-12, Vol. 99, pp. 225~229.
- (5) Zhang, B. and Howes, T. D., 1994, "Material removal mechanism in grinding ceramics," *Ann. CIRP*, Vol. 43, pp. 305~308.
- (6) Xu, H. K. and Jahanmir, S., 1995, "Micro fracture and material removal in scratching of alumina," *J. Mater. Sci.*, Vol. 30, pp. 2235~224.
- (7) Bifano, T., 1988, *Ductile-regime grinding of brittle materials*, Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh.
- (8) Ives, L. K., Evans, C. J., Jahanmir, S., Polvani, R. S., Strakna T. J. and Mcglaulin, M. L., 1993, "Effect of ductile-regime grinding on the strength of hot-isostatically-pressed silicon nitride," in: S. Jahanmir (Ed.) *Machining of Advanced Materials*, National Institute of Standards and Technology SP 847, Government Printing Office, Washington, DC, pp. 341~352.
- (9) Mamalis, A. G., Kundark, J., Gyani, K. and Horvath, M., 2002, "On the Precision Grinding of Advanced Ceramics," *Int. J. Adv. Manf Technol.*, Vol. 20, pp. 255~258.
- (10) Brain, K. R., Albert, J. S., Ronald, O. S., Jeffery, L.A., Darry, G., and Marion, B.G., 2002, "Wire electrical discharge machining of metal bond diamond wheels for ceramic grinding," *International Journal of machine Tool & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1355~1462.