

## 초정밀 연삭기에 의한 사파이어의 나노가공

김우순\*, 김동현<sup>+</sup>, 난바의치<sup>++</sup>  
(논문접수일 2003. 4. 24, 심사완료일 2003. 7. 23)

### A Study on the Nano Grinding of Sapphire by Ultra-Precision Grinder

Woo Soon Kim\*, Dong Hyun Kim<sup>+</sup>, Yoshiharu Namba<sup>++</sup>

#### Abstract

Optical and electronic industries are using lapping and polishing processing as a final finish rather than grinding, because they need more accurate parts of brittle non-metallic materials such as single crystals. Sapphire has been ground by the ultra-precision surface grinder having a glass-ceramic spindle of extremely-low thermal expansion with various cup-type resinoid-bonded diamond wheels of #400-#3000 in grain size. Sapphire can be ground in the ductile mode. And also, the surface roughness and grinding conditions has been clarified. The smooth surface of Sapphire less than 1nm RMS, 1nm Ra can be obtained by the ultra-precision grinding without any polishing process.

**Key Words** : Sapphire(사파이어), Ultra-Precision Surface Grinder(초정밀 연삭기), Ductile Mode (연성모드)

### 1. 서론

취성 재료는 단단하고 깨지기 쉬운 성질을 가진 재료로서, 탄성 변형후에 소성 변형없이 파는 취성 파괴를 일으킨다. 일반적으로, 취성 재료의 가공은 금속재료와는 달리 파괴기구가 현저하게 다르므로 가공하기가 어렵다. 취성재료가 연성 영역에서 가공되기 위해서는 공작물과 지립 절인

간섭량의 비가 충분히 작아야 하며, 그러기 위해서는 대단히 작은 운동분해능으로 공작물 및 절인의 운동이 제어되어야만 한다. 연삭 기계의 강성 및 연삭 지식의 접촉 강성이 충분히 설계하여야 하고 기존의 연삭기계보다 한 단계위의 정도로 개선되어야 한다.

한편, 사파이어<sup>(1)</sup>는 취성재료이면서 광학 플랫폼, 윈도우, 필터, 전자부품, 프리즘, 레이저 로드등 다양한 부품으로

\* 주저자, 원광대학교 기계시스템디자인공학부 (knamba@wonkwang.ac.kr)  
주소: 570-749 전북 익산시 신용동 344-2번지  
+ 원광대학교 기계시스템 디자인공학부  
++ 일본 중부대학교 기계공학부

응용되고 있다. 그리고, 사파이어는 광학 투시 재료로서 가시광선 영역이나 파장영역이 0.17에서 5.5um인범위에 사용되기 때문에 서브 마이크론 가공 정도가 요구된다. 연삭가공은 기계가공에서 주로 최종마무리 가공을 하는 경우에 사용되어지며, 최근 산업의 발달과 함께 제품의 고정도화, 다양화, 생산성 향상등의 요구에 의해 가공에 있어서 고능률과 고정도 가공이 동시에 요구되고 있다<sup>(2)</sup>. 고정도의 사파이어는 취성재료이긴 하지만, 래핑이나 폴리싱의 공정없이 연성모드에 의해 가공되어 질 수 있 5.5um인 범위에 사용되기 때문에 서브 마이크론 가공 정도가 요구된다. 고정도의 사파이어는 취성재료이긴 하지만, 래핑이나 폴리싱의 공정없이 연성모드에 의해 가공되어 질 수 있을것으로 기대된다. 취성 재료인 사파이어를 연성모드 연삭으로 가공하기 위하여 견고한 초정밀 연삭기가 개발되었으나<sup>(3)</sup> 연성모드 연삭에 대한 실제적인 연삭가공 조건은 확실하지 않은게 사실이다.

본 연구에서는 사파이어를 연성모드 연삭으로 가공하기 위한 연삭 조건을 킵형 레진본드 다이아몬드 휠과 극저열팽창계수를 갖는 스프링들을 사용한 초정밀 연삭기를 이용하여 실험적으로 고찰하였다. 또한, 표면 거칠기는 나노오더의 값을 얻을 수 있음을 보이고, 사파이어 뿐만 아니라 단결정 재료등의 취성재료 가공분야에 응용될 것으로 판단된다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

#### 2.1.1 초정밀 연삭기

본 연구에 사용한 초정밀 연삭기의 외관사진을 Photo. 1에 나타내었다. 여기에서, 시스템 전체는 실온  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 온도 제어되는 실험실내에 설치되었다.

초정밀 연삭기의 주축에 열팽창계수가  $3 \times 10^{-8}/\text{K}$ 인 재료를 사용하여, 열강성이 높였다. 그리고, 지석축계의 강성을 높이기 위해 외경이 지석직경과 같도록 125mm로 하였다.

지석축 및 회전 테이블의 베어링은 고강성, 고흡진성 및 고회전 정도가 필요하기 때문에, 초정밀 연삭기에는 정압유 베어링을 사용하였다. Table 1에 지석축과 회전 테이블의 강성 및 회전 정도를 나타내었다.

#### 2.1.2 다이아몬드 휠

취성 재료를 가공하기 위해서는 다음과 같은 사항을 갖춘 연삭 지석이 필요하다.

- ① 예리한 절인을 가진 지석
- ② 강한 경도와 인성이 높은 지립
- ③ 피삭재와 친화력이 적은 지립
- ④ 지립에 미치는 연삭저항에 대해 필요한 보지력을 갖는 지립결합제
- ⑤ 드레싱 효과를 기대할 수 있는 결합제

위의 조건을 만족하는 연삭 지석으로 다이아몬드 지립은 천연다이아몬드나 합성다이아몬드를 사용하고 결합제는 레진본드나 메탈본드를 이용한 것들이 있으나, 사파이어와 같은 취성재료 가공시에는 레진본드 결합제를 이용한 연삭 지석이 적합하다고 사료된다.

본 연구에 사용된 연삭 지석은 외경 125mm, 지립층 3mm폭×3mm두께의 킵형 레진 본드 다이아몬드 휠을 사용하였고, Photo. 2에 나타내었다.

Table 2에 본 연구에 사용한 지석의 종류와 그 입경 및 평균 입경을 나타내었다. 또한, 트루잉은 SD200 지석을 사용하였고, 드레싱은 GC400 스틱형을 사용하여 연삭속도  $V_s = 180\text{m}/\text{min}$ , 이송속도  $V_w = 0.6\text{m}/\text{min}$ , 절입  $a = 1\mu\text{m}$ 의 조건으로 실험하였다.

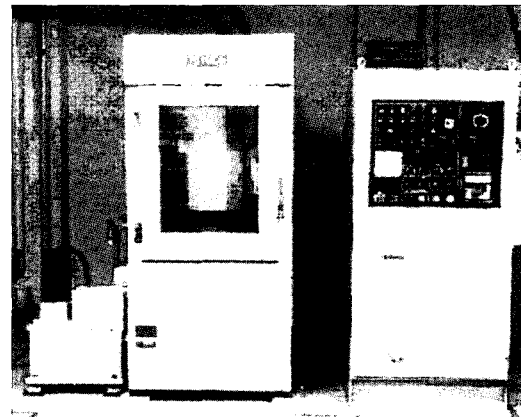


Photo. 1 Ultra-precision Grinder

Table 1 Properties of Ultra-precision Grinder

	Direction	Rotary table	Main spindle
Stiffness	Thrust	108kgf/um	48.5kgf/um
Rotational Accuracy	Radial Thrust	0.06um 0.02um	0.08um 0.05um

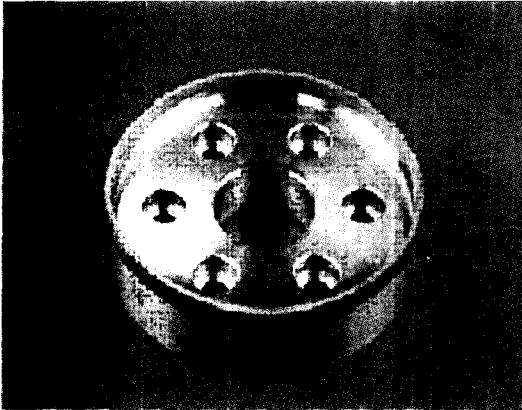


Photo. 2 Diamond Wheel

Table 2 Grain Sizes of Diamond Wheel

Wheel	Grain size (um)	Mean grain size (um)
SD3000-75-B	2 - 6	4
SD1500-75-B	8 - 15	11.5
SD1000-75-B	8 - 20	18.5
SD800-75-B	20 - 40	30
SD400-75-B	40 - 60	50

### 2.1.3 사파이어

사파이어는 산화 알루미늄의 일종으로, 자연에 풍부한 재료이며, 광 투시의 광학 특성, 물리적 특성, 열전도, 열과 부식 저항이 우수하다. 특히, 다이아몬드 다음으로 경도가 강하며 모스 경도 9이다. 실험에 사용된 사파이어의 크기는 11mm×11mm×2mm로 하였으며, 연삭가공이 이루어질 때 사파이어의 모서리부분의 파손이 발생하지 않도록 필렛가공을 하여 제작하였다. Fig. 1은 사파이어의 결정 방향을 나타내었다.

### 2.2 실험 방법

본 연구는 고정도 초정밀 연삭기와 다양한 컵형 레진 본드 다이아몬드 휠을 이용하여 사파이어를 연삭 가공하였다.

다이아몬드 휠로 본 실험을 하기 전에 세라믹 테이블에 사파이어를 진공척으로 장착한 후, 4개의 노즐을 통하여 수돗물을 분사시켜가면서 트루잉과 드레싱을 행하였으며, 각 조건에 따른 실험할 때마다 반복하여 실행하였다.

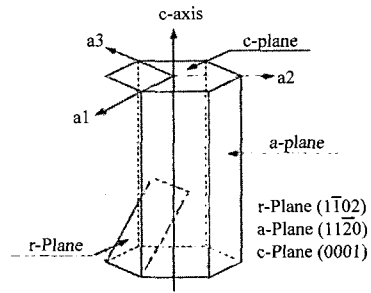


Fig. 1 Crystallographic structure of sapphire

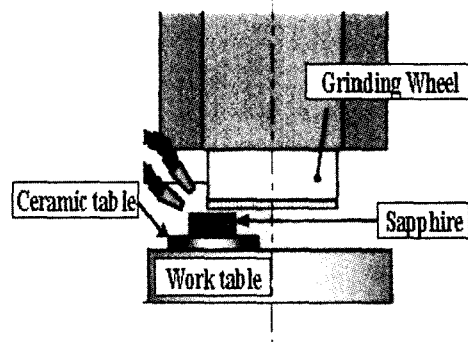


Fig. 2 Grinding layout

연삭 방향은 (0001)면에 <0001>을 가공하도록 결정하였으며, 다이아몬드 휠과 사파이어는 연삭액으로 수돗물을 사용하였다.

Fig. 2는 전체적인 연삭 실험 레이아웃을 나타내었다.

연삭 표면은 노마르스키 간섭 현미경을 이용하여 표면 형상을 측정하였고, 표면 거칠기는 Zygo New View 200을 이용하여 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

연삭 표면은 파괴 모드, 파괴 및 연성 모드, 연성 모드<sup>(4)</sup> 등 3가지 타입으로 구분할 수 있다.

본 실험에서는 노마르스키 간섭 현미경을 이용하여 위의 3가지 모드를 뚜렷하게 구분하였고, Fig. 3-5에 나타내었다.

Fig. 3, 4, 그리고 Fig. 5는 SD800-75-B, SD1000-75-B, SD1500-75-B 각각의 다이아몬드 휠을 이용하여 연삭 속도 Vs=20m/s, 다이아몬드 휠 회전당 이송 f=35um/rev, 절삭

깊이  $a=1\mu\text{m}$ 의 연삭조건하에서 얻어진 결과이다.

Fig. 3에서 표면의 형상은 취성 파괴에 의해 나타난 결과이며, 파괴 모드에 의해 연삭된 결과를 보이고 있으며 이 결과는 취성 재료의 전형적인 연삭 표면을 나타내었다.

Fig. 4는 취성 재료인 사파이어의 연삭 표면이 파괴 모드와 연성 모드에 의해 연삭된 표면을 나타낸 것으로 두 가지 모드에 의해 가공된 형상이 표면에 그대로 나타나고 있으며, 불규칙한 입자 또는 연삭된 후 발생한 칩의 충돌에 의해 발생한 것으로 보이는 홈이 연삭 마크위에 나타났다.

Fig. 5는 연성 모드로 가공된 우수한 연삭 표면을 보여주는 결과로서, 노마르스키 간섭 현미경으로 관찰한 결과, 어떠한 크랙도 찾아볼 수 없었으며, 취성 재료인 사파이어도

최적의 연삭 조건과 초정밀 연삭기에 의해 나노 표면을 얻을 수 있음을 보여주었다.

사파이어는 다양한 #400-#3000의 레진 본드 다이아몬드 휠과 초정밀 연삭기에 의해 가공되었으며 SD1500-75-B와 SD3000-75-B의 다이아몬드 휠로 연삭 가공하였을 경우에 아주 우수한 연삭 표면을 얻을 수 있었다.

Fig. 6은 연삭 모드와 연삭 조건의 변화와의 관계를 나타낸 것으로, 다이아몬드 휠의 회전당 이송과 다이아몬드 휠의 지립 크기에 따른 연삭 모드의 경향을 보여준다.

평균 지립 크기가  $11.5\mu\text{m}$  이하인 다이아몬드 휠을 사용한 경우에 실험한 모든 영역에서 연성 모드를 얻었다. 연성 모드에서 연삭 표면은 전반적으로 나노 오더의 표면 거칠기

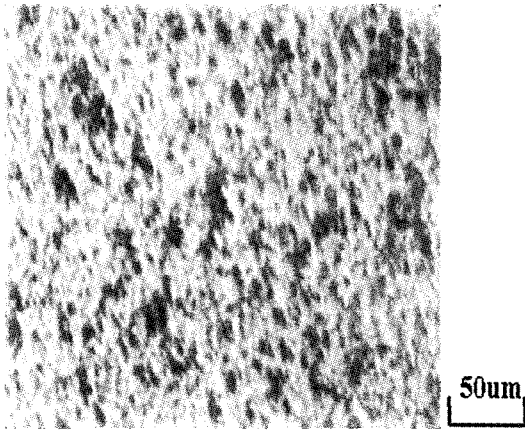


Fig. 3 Fracture mode grinding

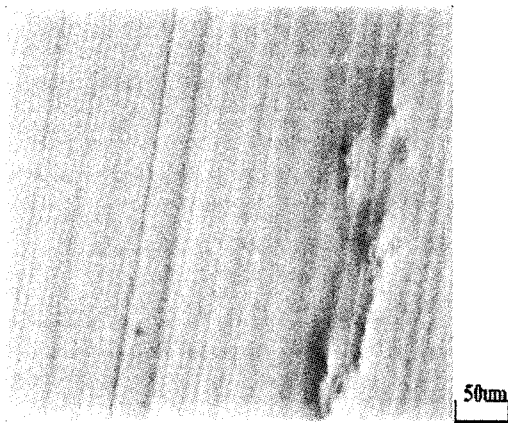


Fig. 4 Ductile and Fracture mode grinding

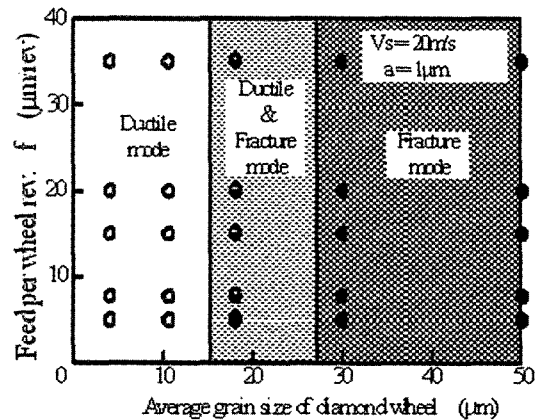


Fig. 6 The change of grinding mode with the feed per wheel revolution and grain size of diamond wheels

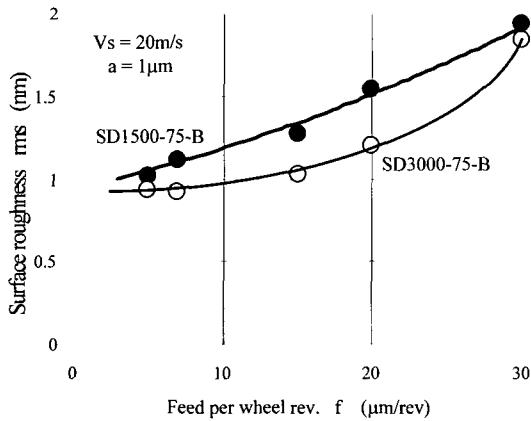


Fig. 7 The effect of feed per wheel revolution on the surface roughness

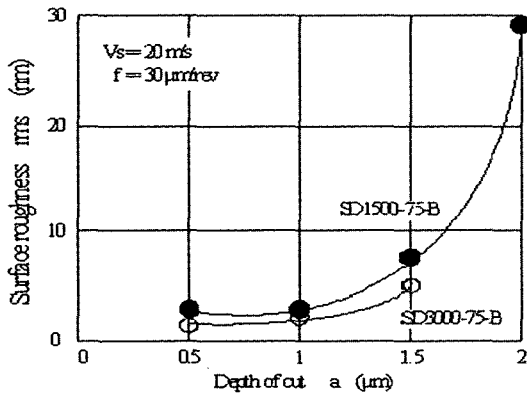


Fig. 8 The effect of depth of cut on the surface roughness

를 보였으며 표면에 어떠한 크랙도 나타나지 않았다. 파괴 모드는 평균 지립 크기가  $30\mu\text{m}$  이상인 다이아몬드 휠을 사용한 경우에 나타났으며, 파괴 모드와 연성 모드가 공존하는 영역은 실제 연삭 가공중에는 확실하게 그 경계를 구분할 수는 없었다.

하지만, 연성 모드와 파괴 모드 사이에 연성 모드 및 파괴 모드가 있음을 확인할 수 있었다. 연성 모드 및 파괴 모드로부터 연성 모드까지의 천이는 사파이어를 가공하는데 있어서 가장 중요한 것이라 사료된다.

Fig. 7은 SD1500-75-B과 SD3000-75-B를 이용한 경우, 표면 거칠기와 휠의 회전당 이송의 관계를 보여준다.

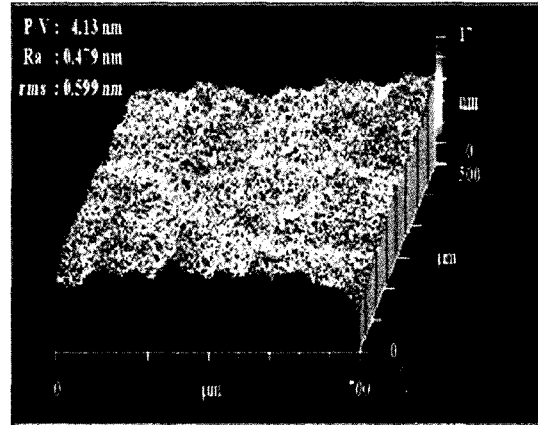


Fig. 9 A surface profile of ground sapphire by SD1500-75-B

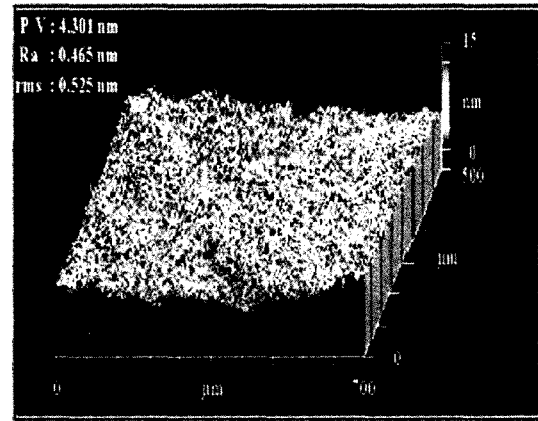


Fig. 10 A surface profile of ground sapphire by SD3000-75-B

위 결과로부터, 표면 거칠기는 다이아몬드 휠의 회전당 이송이 감소함에 따라 표면 거칠기도 감소하는 경향을 보였으며, 표면 거칠기는 다이아몬드 휠의 회전당 이송에 의존함을 알았다.

Fig. 8은 연삭깊이에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸 것으로 연삭깊이의 증가에 따라 연삭면의 표면거칠기가 나빠짐을 보였다. 연삭깊이의 증가에 따라 한 개의 지립에 의한 연삭량이 증가하고 마모되어 연삭면의 표면 거칠기에 영향을 미친 것으로 사료된다.

Fig. 9과 Fig. 10은 SD1500-75-B와 SD3000-75-B를 이용하여 연삭속도  $V_s=20\text{m/s}$ , 다이아몬드 휠의 회전당 이송

$f=5\mu\text{m}/\text{rev}$ , 절삭깊이  $a=1\mu\text{m}$ 로 연삭 가공한 사파이어의 표면 사진을 보여주고 있다.

위 표면 사진은 Zygo New View 200으로 측정된 것이다. 사파이어를 SD1500-75-B로 연삭 가공하여 얻은 표면 거칠기는 4.13nm P-V, 0.479nm Ra 그리고, 0.599nm RMS 이었으며, SD3000-75-B로 연삭 가공하여 얻은 표면 거칠기는 4.301nm P-V, 0.465nm Ra 그리고, 0.525nm RMS 등 나노 오더의 값을 얻으므로써 취성 재료도 연성 모드로 가공할 수 있음을 확인할 수 있었다.

취성 재료인 사파이어를 나노 오더의 표면 거칠기를 얻기 위해서는 저이송으로 높은 순도의 다이아몬드 지립을 사용함으로써 얻을 수 있음을 위의 결과로부터 알 수 있었으며, 사파이어라 할 지라도 어떠한 연마 공정없이 초정밀 연삭기를 이용하여 1nm 오더의 표면 거칠기를 얻었다.

#### 4. 결론

취성재료인 사파이어는 다양한 연삭 조건하에서 여러 가지의 컵형 레진 본드 다이아몬드 휠과 초정밀 연삭기를 이용하여 연성 모드로 나노 오더의 연삭 표면을 얻을 수 있었다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 사파이어의 연삭 표면은 평균 지립 크기가 30 $\mu\text{m}$ 이상에서는 취성 모드, 평균 지립 크기가 18.5 $\mu\text{m}$ 에서는 취성과 연성 모드, 평균 지립 크기가 11.5 $\mu\text{m}$ 이하에서는 연성모드 형태를 나타내었다.
- (2) 취성재료인 사파이어의 연성 모드는 지립 크기가 8-15 $\mu\text{m}$ 와 2-6 $\mu\text{m}$ 이하인 다이아몬드 휠을 이용하여 얻었으며, 연성 모드로 얻어진 사파이어의 표면에는 어떠한 미세크랙도 없었다.

- (3) 사파이어의 연성 모드하에서 연삭 표면 거칠기는 다이아몬드 휠의 회전당 이송과 지립의 크기에 의존하며, 연삭깊이가 깊어짐에 따라 표면거칠기가 나빠지는 경향을 보였다.
- (4) 이송 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$ , 연삭깊이 0.5 $\mu\text{m}$ , 연삭속도 20m/s하에서, SD1500-75-B로 연삭한 경우, P-V 4.13nm의 표면 거칠기를 얻었으며, SD3000-75-B로 연삭한 경우, P-V 4.301nm의 표면 거칠기를 얻었다.
- (5) 나노 오더의 사파이어 표면 거칠기는 어떠한 래핑이나 연마 공정 없이 초정밀 연삭기만으로도 얻을 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

#### 참고 문헌

- (1) Namba, Y. and Tsuwa, H., 1978, "Mechanism and Some Applications of Ultra-Fine Finishing, Annals of the CIRP", Vol. 27, No. 1, pp. 513~515.
- (2) Cho, J. H., Won, J. H., Park, W. K., Lee, J. O., Kim, M. S. and Kim, S. S., 2003, "A Study on the Surface Grinding of Optical Glass Utilizing Electolytic In-Process Dressing", *Trans. of KSMTE 2003 Spring Conference*, pp. 410~415.
- (3) Namba, Y., 1990, "Ultra-precision Grinding of Optical Materials to Produce Smooth Optical Components", *OSA 1990 Technical Digest Series*, Vol. 9, pp. 38~41.
- (4) Namba, Y., Yamada, Y., Tsuboi, A., Unno, K., and Nakao, H., 1992, "Surface Structure of Mn-Zn Ferrite Single Crystals Ground by an Ultra-precision Surface Grinder with Various Diamond Wheels", *Annals of the CIRP*, Vol. 1, No. 1, pp. 347~349.