

실리콘 카바이드의 초정밀 연삭 가공에 관한 연구

Research on Ultra-precision Grinding Work of Silicon Carbide

박순섭^{1,2,✉}, 원종호²
Soon Sub Park^{1,2,✉} and Jong Ho Won²

1 한국생산기술연구원 호남권기술지원본부 (Honam Technology Division, Korea Institute of Industrial Technology)

2 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

✉ Corresponding author: pss4633@kitech.re.kr, Tel: 062-600-6151

Manuscript received: 2009.3.25 / Accepted: 2009.6.17

Silicon carbide (SiC) has been used for many engineering applications because of their high strength at high temperatures and high resistances to chemical degradation. SiC is very useful especially for a glass lens mold whose components demanded to the machining with good surface finish and low surface damage. The performance and reliability of optical components are strongly influenced by the surface damage of SiC during grinding process. Therefore, the severe process condition optimization shall be necessary for the highly qualified SiC glass lens mold. Usually the major form of damage in grinding of SiC is a crack occurs at surface and subsurface. The energy introduced in the layers close to the surface leads to the formation of these cracks. The experimental studies have been carried out to get optimum conditions for grinding of silicon carbide. To get the required qualified surface finish in grinding of SiC, the selection of type of the wheel is also important. Grinding processes of sintered SiC work-pieces is carried out with varying wheel type, depth of cut and feed using diamond wheel. The machining result of the surface roughness and the number of flaws, have been analyzed by use of surface profilers and SEM.

Key Words: Silicon Carbide (실리콘 카바이드), Ultra-precision Grinding (초정밀 연삭), Vitrified-bond Diamond Wheel (비트리파이드 본드 다이아몬드 슛돌), Surface Roughness (표면 조도), Form Accuracy (형상 정밀도)

1. 서론

실리콘 카바이드(SiC)는 오랫동안 경도와 강성, 강도 열팽창 계수, 낮은 마찰 저항을 착용하고 상 승된 온도 용도를 위한 이상적인 소재로 각광받았다. 또한 높은 열전도성 등의 우수한 특성이 그 가치의 인정 받아왔다.¹⁻⁵ 최근 몇 년 동안, 고순도 다결정 SiC 성형을 이용하여 거울, 또는 렌즈 광학 유리 사출 성형 과정에서 성공적으로 사용하고 있다.⁶ SiC의 우수한 특성은 재료 기계뿐만 아니라 극도로 높은 정밀도를 갖는 nanometric 표면 품질

을 달성하기 위하여 여러 산업용 애플리케이션이 필요로 한다.

본 연구에서의 근본적인 목적은 낮은 표면손상 즉, 초정밀 연삭에서 높은 품질로 SiC 표면을 생성하기 위한 적합한 프로세스 개발에 있다. 취성 재료의 낮은 손상 가공을 위한 본 연구는 다이아몬드 연삭 공구이용 시 연삭에서 기인한 표면조도와 그 손상을 포함한다. 형상을 창성하고 형상의 정밀도와 관련된 기계가공 파라미터와 기계적인 필요사항들에 대한 연구도 포함한다. SiC 연삭에서 nanometric 품질의 표면 생성을 최소의 표면손상을

로 이루어 내는 방법연구에 초점이 맞춰졌다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 초정밀 마이크로 연삭기

본 연구에 사용된 초정밀 가공기는 Fig. 1의 사진처럼 도시바사의 ULG-100C(H³)로 초정밀 마이크로 연삭기이다. 초정밀 가공기는 V-V 롤러 가이드와 리니어 모터 구동(X, Z 축)과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스피들과 고속 고정도 공기정압 베어링 스피들로 구성되어 있다. 두 안내면은 각각 X 축과 Z 축의 직교형태를 이루며 구동한다. Z 축의 중심부에 해당하는 안내면에 워크스핀들이 고정되어 회전하며, 안내면의 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. X 축 구동안내면 위에는 고속 고정도 공구 스피들이 고정되어 연삭 슷들을 설치할 수 있으며, 스피들 구동방향과 수직방향으로 구동한다.

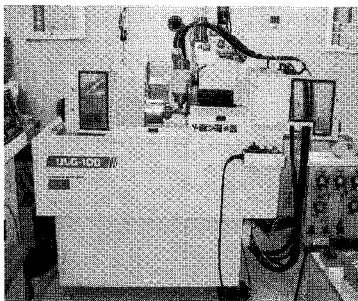


Fig. 1 Ultra-precision machine (ULG-100C(H3))

2.1.2 초정밀 측정기

Fig. 2는 비구면 형상 측정 장비로는 Talyer Hobson사의 Form Talysurf series 2+를 사용하였다. 접촉식 형상 측정기로 측정범위는 120mm이며, 분해능은 0.86nm이다.

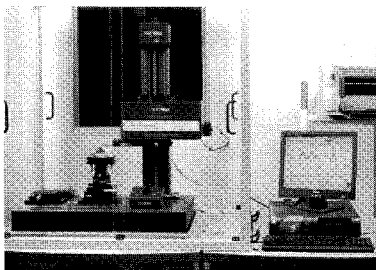


Fig. 2 Form talysurf 2+ measuring instrument

Fig. 3은 국부적인 표면조도 측정기로 Nano System사의 NV-E1000의 장비이다. 비접촉방식의 레이저 간섭무늬로 표면조도를 측정하는 장비이다.

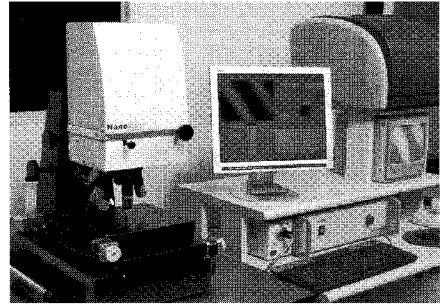
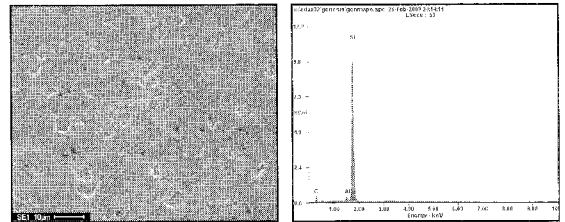


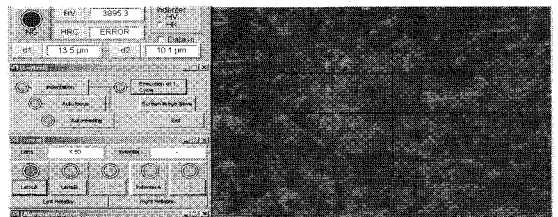
Fig. 3 NV-E1000 measuring instrument

2.1.3 실리콘 카바이드와 다이아몬드 슷들

연삭 실험에 사용된 재료는 광학용 실리콘 카바이드(6H-SiC, UAS)로 소재 성분 분석과 비커스 경도측정 값은 Fig. 4와 같이 At% 비율로 CK 52.28%, AlK 1.25%, SiK 46.47%이며, 비커스 경도는 3,995HV로 측정되었다.



(a) SEM image of the single crystal 6H-SiC



(b) Vickers hardness test of the single crystal SiC

Fig. 4 Characterization of the original single crystal SiC in terms of surface defects and hardness

연삭 가공에 사용된 공구는 Fig. 5와 같이 비트 리파이드 본드를 결합제로 사용하는 다이아몬드 슷들을 사용하였으며, 슷들의 mesh는 #14,000, 슷들의 직경은 Φ 12mm이다.

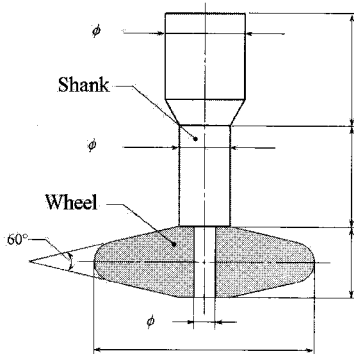


Fig. 5 Shape of diamond wheel(Cross grinding)

2.2 실험방법

현재 많이 행하여지고 있는 축 대칭 비구면의 대표적인 수직축(Cross) 연삭법을 사용하였다.

미소한 오목 면의 가공을 가능케 하기 위해 스톨의 축과 공작물의 축이 경사축 구성으로 되어있는 경우도 있으나, 대다수의 경우는 Fig. 6 처럼 스톨 축과 공작물의 축이 직교하는 중형구성으로, X, Z 축의 2 축 동시제어에 의한 연삭 경로에 따라 가공 된다. 연삭점에 있어서 공작물의 회전방향과 스톨의 주축 벡터가 직교하는 것이 이 방식의 특징이다.

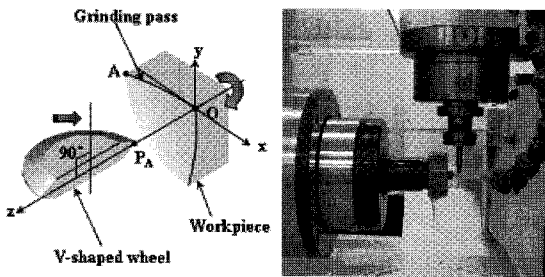


Fig. 6 Cross grinding method

SiC 재료의 초정밀 연삭 가공을 비구면 및 구면 가공에 적용하기 위하여 먼저 최적의 가공 조건을 구하기 위해 각각의 가공조건(연삭속도, 워크스핀들 속도, 이송속도, 절입 깊이)에 대하여 얻어지는 가공결과(형상정밀도, 표면조도)와 가공 표면의 데미지를 파악하기 위해 SEM 사진을 찍고, 초정밀 연삭 가공 조건 관점에서 종합적으로 분석하였다.

3. 실험 결과

3.1 연삭속도 변화에 따른 표면조도

이번 연구에 사용된 초정밀 가공기와 연삭 스톨의 최대 연삭속도는 1,500m/min 이다. 최대 연삭속도를 고려하여, 다음과 같이 연삭속도를 942, 1,017, 1,092, 1,168, 1,243, 1,318m/min 으로 변화를 주면서 워크스핀들은 100rpm, 이송속도 0.5mm/min, 절입 깊이 0.2um 에서 연삭 가공한 후 표면조도를 측정하였다.

Fig. 7 은 수직축 연삭법으로 실리콘 카바이드를 연삭속도 변화에 따른 표면조도를 측정한 결과이다. 연삭속도가 1,243m/min 일 때 표면조도 Ra 값이 2.78nm 로 가장 우수하였다. 저속의 연삭 속도에서는 스톨의 회전 밸런싱 커지면서 공기정압베어링에서 소음이 크게 나타나 표면조도를 저하시킨 것으로 관찰되었다.

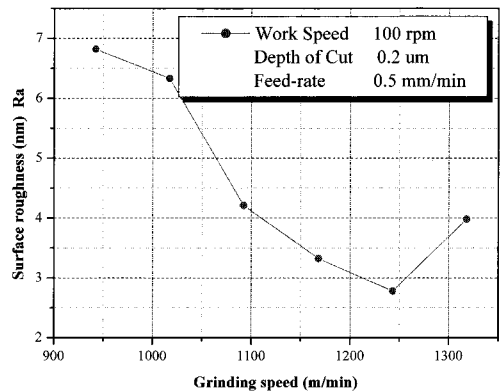


Fig. 7 Surface roughness versus grinding speed

3.2 Work Spindle 회전속도 변화에 따른 표면조도

SiC 소재는 경도도 높고 취성이 있어 본 연구 이전의 경험으로 워크스핀들 회전속도가 낮을수록 표면조도가 좋음을 알 수 있었기에 워크스핀들 회전속도를 저속인 50, 75, 100, 125, 150, 200rpm 으로 변화를 주면서, 연삭속도는 1,243m/min, 이송속도 0.5mm/min, 절입 깊이 0.2um 으로 고정 한 후 워크스핀들 회전속도를 변화시키면서 표면조도를 측정하였다.

Fig. 8 은 수직축 연삭법으로 실리콘 카바이드를 워크스핀들 회전속도 변화에 따른 표면조도를 측정한 결과이다. 워크스핀들 회전속도 75~100rpm 에서 표면조도 Ra 2.78~2.82nm 로 우수하게 실험

되었다. 하지만 워크 회전속도가 커질수록 공작물과 연삭 스톨의 상대운동이 커져서 표면조도는 나빠지는 양상을 보였다.

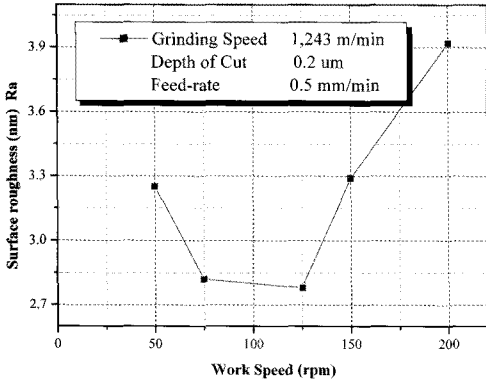


Fig. 8 Surface roughness versus work speed

3.3 이송속도 변화에 따른 표면조도

Fig. 9 는 수직축 연삭법으로 실리콘 카바이드로 이송속도 변화에 따른 표면조도를 측정 한 결과이다.

이송 속도를 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2mm/min 으로 변화를 주고, 연삭 속도는 1,243m/min, 워크 스피들 회전속도 100rpm, 절입 깊이 0.2um 에서 이송속도를 변화시키면서 표면조도를 측정하였다.

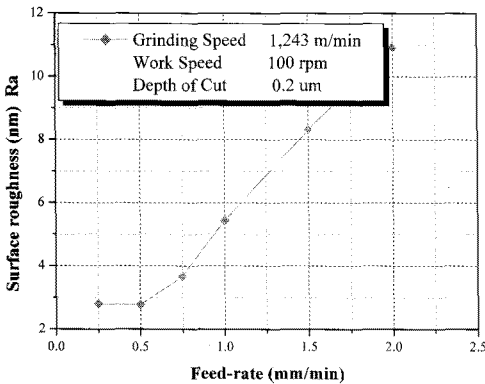


Fig. 9 Surface roughness versus feed-rate

SiC 소재 자체가 소결 제품이다 보니 이송속도에 민감하게 반응하였다. 이송속도가 0.25~0.5mm/min 일 때 가장 좋은 표면 조도 Ra 2.78~2.81nm 를 나타내었다. 그 이상의 이송속도에서는 상당히 거친 표면 조도를 나타내고 있다.

3.4 절입 깊이 변화에 따른 표면조도

Fig. 10 은 수직축 연삭법으로 실리콘 카바이드로 절입 깊이 변화에 따른 표면조도를 측정 한 결과이다.

절입 깊이를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1um 으로 변화를 주고, 연삭 속도는 1,243m/min, 워크 스피들 회전속도 100rpm, 이송속도 0.5mm/min 에서 절입 깊이를 변화시키면서 표면 거칠기를 측정하였다.

절입 깊이가 0.1um 일 때보다 0.2um 일 때 표면 조도가 우수하게 나타났다. 절입 깊이가 너무 작으면 공작물과 연삭 스톨이 미끄러지는 스틱-슬립 현상이 일어난다고 사료된다. 절입 깊이가 1um 으로 하였을 때는 가공 후 연삭 스톨의 마모가 심하게 발생하였다.

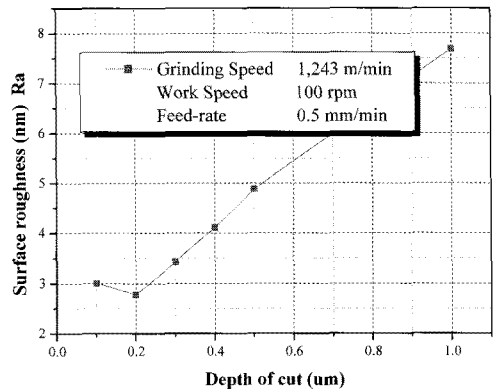


Fig. 10 Surface roughness versus depth of cut

4. 최적의 연삭 조건으로 유리 렌즈 성형용 SiC 코어 가공

위 실험으로 SiC 소재의 비트리파이드 본드 다 이아몬드 스톨 연삭에서는 Table 1 과 같은 최적의 연삭 조건을 구할 수 있었다. Fig. 11 은 가장 우수한 표면조도 Ra 2.78nm 데이터이다.

Table 1 Best Grinding condition

Grain (#)	14,000
Bond	Vitrified
Grinding Speed (m/min)	1,243
Work spindle speed (rpm)	100
Feed-rate (mm/min)	0.5
Depth of cut (um)	0.2

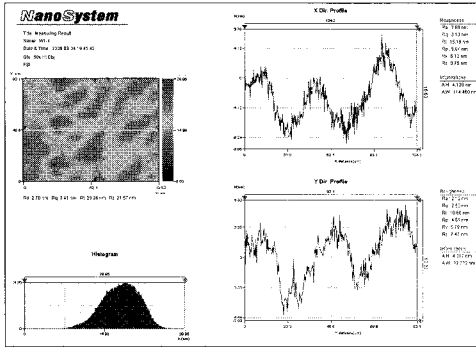


Fig. 11 Measure of Test SiC by Surface Roughness

Table 1 의 조건으로 유리 렌즈 성형용 SiC 코어를 가공하였다.

유리 렌즈 성형용 SiC 코어는 한 개의 비구면 코어와 구면 코어로 구성이 되어 있다.

형상은 보정 프로그램을 사용하여 보정하였고, 형상과 표면조도는 측정은 Form talysurf series 2+로 측정하였다. 측정 결과 Fig. 12~13 에서 보는 바와 같이 다이아몬드 스톨 #14,000 로 최종 정삭 가공된 비구면 유리 렌즈 성형용 코어의 형상 정밀도를 측정된 결과로 형상정밀도가 구면 코어는 0.2454μm, 비구면 코어는 0.1711μm 이다.

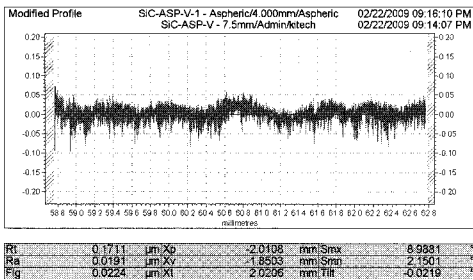


Fig. 12 Measure of Aspheric lens by Form Talysurf (P-V= 0.1711um)

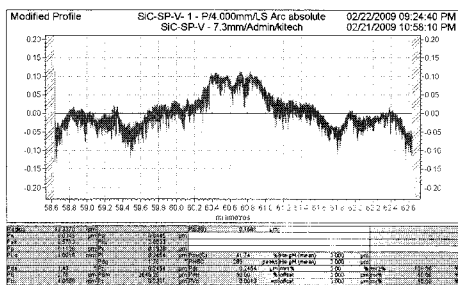


Fig. 13 Measure of spherical lens by Form Talysurf (P-V= 0.2454um)

Fig. 14~15 는 표면 조도를 측정된 결과로 구면 코어의 표면 조도는 Ra : 4.4nm, Rt : 41.9nm 의 값과 비구면 코어의 표면 조도는 Ra : 4.3nm, Rt : 55.3nm 의 값을 얻었다.

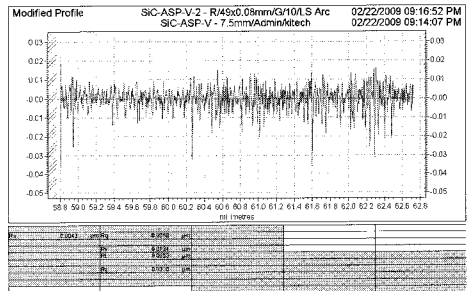


Fig. 14 Measure of Aspheric lens molding core by Surface Roughness (Ra = 4.3nm, Rt = 55.3nm)

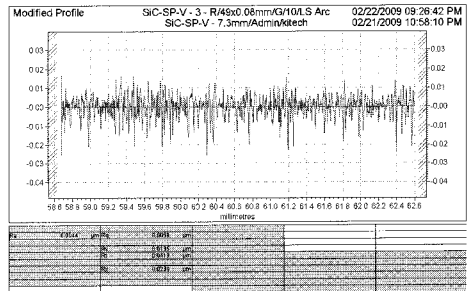


Fig. 15 Measure of spherical lens molding core by Surface Roughness (Ra = 4.4nm, Rt = 41.9nm)

Fig. 16 은 코어를 가공 한 후 연삭에 의해 기공이나 크랙이 존재하는지의 여부를 알아보기 위해 폴리싱을 수행 한 후 SEM 사진을 찍어 보았다.

연삭 가공으로 인한 테미지는 보이지 않았다.

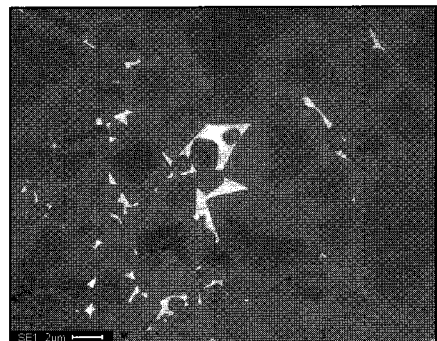


Fig. 16 SEM image of the ground surface of the polished SiC glass lens mold with the vitreous bond diamond wheel

Fig. 17(a)는 Φ 12mm, #3000 레진본드 다이아몬드 슷돌로 SiC 를 연삭한 후의 슷돌 표면 사진이며, (B)는 Φ 12mm, #14000 비트리파이드본드 다이아몬드 슷돌로 SiC 를 연삭한 후의 슷돌 표면 사진이다. 비트리파이드본드 다이아몬드 슷돌의 경우가 눈매임 현상들이 잘 일어나지 않음을 볼 수 있다.

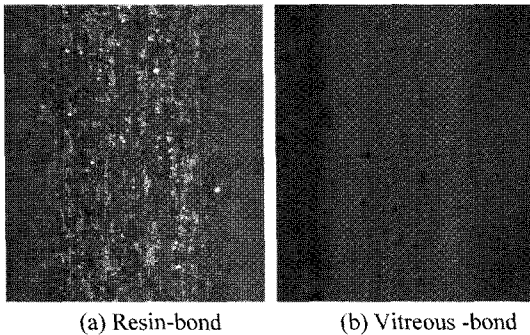


Fig. 17 Microscope image of the ground surface of diamond wheel (20X)

5. 결론

본 연구에서는 실리콘 카바이드를 수직축 연삭 가공에서의 비트리파이드 본드 다이아몬드 슷돌을 이용하여 최적의 연삭 조건과 가공 표면의 적은 데미지 조건을 구하였고, 선행 실험의 데이터를 적용하여 비구면 유리 렌즈 성형용 SiC 코어 가공 하였다.

첫째, SiC 소재의 최적의 가공 조건은 비트리파이드 본드 다이아몬드 슷돌로 연삭속도 1,243m/min, 워크 스피들 회전속도 100rpm, 이송속도 0.5mm/min, 절입 깊이 0.2um 일 때 표면조도가 Ra 로 2.78nm 로 우수하였다.

둘째, 첫째 항에서 구한 최적의 가공 조건으로 비구면 유리렌즈 성형용 SiC 코어를 가공하였다.

비구면 유리 렌즈 성형용 코어의 형상 정밀도를 측정 한 결과로 형상정밀도가 구면 코어는 P-V : 0.2454um, 비구면 코어는 P-V : 0.1711um 이다.

표면 조도를 측정 한 결과로 구면 코어의 표면 조도는 Ra : 4.4nm, Rt : 41.9nm 의 값과 비구면 코어의 표면 조도는 Ra : 4.3nm, Rt : 55.3nm 의 값을 얻었다.

셋째, 탄소 성분을 함유하고 있어 다이아몬드 슷돌로 가공한 후 표면에 데미지가 발생할 수 있

어 폴리싱 후 표면을 SEM 사진을 찍어 보았다.

약간의 흠집이 보이기 는 하나 유리 렌즈의 성형용 코어로 사용하기에는 무리가 없는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. CVD Silicon Carbide. At: <http://www.cvdmaterials.com/>
2. Pature, N. P., Evans, C. J., Xu, H. K. and Lawn, B. R., "Low-Damage Enhanced Machinability of Silicon Carbide via Microstructural Design," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 78, No. 1, pp. 215-217, 1995.
3. Xu, H. K., Pature, N. P. and Jahanmir, S., "Effect of Microstructure on Material-Removal Mechanisms and Damage Tolerance in Abrasive Machining of Silicon Carbide," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 78, No. 9, pp. 2443-2448, 1995.
4. Lawn, B. R., Pature, N. P., Cai, H. and Guiberteau, F., "Making Ceramics "Ductile"," Science, Vol. 263, No. 5150, pp. 1114-1116, 1994.
5. Pature, N. P. and Lawn, B. R., "Contact Fatigue of a Silicon Carbide with a Heterogeneous Grain Structure," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 78, No. 6, pp. 1431-1438, 1995.
6. Suzuki, H., Kodera, S., Nakasuji, T., Ohta, T. and Syoji, K., "Precision Grinding of Aspherical CVD-SiC Molding Die," JSPE, Vol. 32, No. 1, pp. 25-30, 1998.