

# SiC계 세라믹 절삭공구의 절삭특성 평가 Part 1 : SiC계 절삭공구의 미세구조와 기계적 특성

박준석\*, 김경재\*, 심완희\*\*, 권원태\*\*\*, 김영욱\*\*\*\*

## Cutting Characteristics of SiC-based Ceramic Cutting Tools Part 1 : Microstructure and Mechanical Properties of SiC-based Ceramic Cutting Tools

June Suek Park\*, Kyung Jae Kim\*, Wan Hee Shim\*\*, Won Tae Kwon\*\*\* and Young-Wook Kim\*\*\*\*

### ABSTRACT

In order to fulfil the requirements of the various performance profiles of ceramic cutting tools, six different SiC-based ceramics have been fabricated by hot-pressing (SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>composites) or by hot-pressing and subsequent annealing (monolithic SiC and SiC-TiC composites). Correlation between the annealing time and the corresponding microstructure and the mechanical properties of resulting ceramics have been investigated.

The grain size of both Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiC in SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites increased with the annealing time. Monolithic SiC has the highest hardness, SiC-TiC composite the highest toughness, and the SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite the highest strength among the ceramics investigated. The hardness of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites was relatively independent of the grain size, but dependent on the sintered density. The cutting performance of the newly developed SiC-based ceramic cutting tools will be described in Part 2 of this paper.

**Key Words :** Microstructure(미세조직), Mechanical properties(기계적 성질), Ceramic tool(세라믹 공구), Hardness(경도), Fracture toughness(파괴인성)

### 1. 서론

세라믹공구를 사용하여 공작물을 절삭할 경우 다른 공구와 마찬가지로 파손과 마멸이 문제가 된다. 공구의 급작스런 파손방지를 위해서 세라믹 공구가 갖추어야 할 성질은 인성과 열충격 저항이고 마멸 방지를 위해 갖추어야 할 성질은 경도와 내마멸성 그리고 화학적 안정성이다. 세라믹공

구는 일반적으로 초경공구에 비하여 낮은 인성과 열충격저항을 갖고 있어 공구파손이 잘 발생한다. 반면 높은 내마멸성과 고온경도, 화학적 안정성 등의 장점을 갖추고 있어 마멸이 잘 발생하지 않는다. 결과적으로 세라믹 공구는 높은 경도를 갖는 공작물을 적은 절삭깊이와 이송량을 주어 고속으로 절삭하는데 많이 사용된다. 세라믹 공구

접수: 2001년 1월 9일

\* 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원

\*\* 서울시립대학교 재료공학과 대학원

\*\*\* 서울시립대학교 기계정보공학과 \*\*\*\* 서울시립대학교 재료공학과

Table 1 Characteristics of the Ceramic Insert

Characteristics	Composition	Etc.
T o l F r a c t u r e	1) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiC whisker <sup>(1)</sup>	SiC : low thermal expansion, high thermal conductivity
	2) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub> <sup>(2,3)</sup>	ZrO <sub>2</sub> : increment of fracture toughness due to transformation toughening
	3) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC <sup>(2)</sup>	crack deflection
	4) SiAlON <sup>(1)</sup>	excessive flank wear
	5) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC <sup>(4,5)</sup>	Addition of high conductivity material(TiC) → increment of fracture toughness
Thermal shock resistance ( $= \frac{\sigma a}{aE}$ ) $\sigma$ = thermal conductivity $a$ = fracture toughness $\alpha$ = thermal expansion $E$ = Young's modulus	1) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiC whisker <sup>(1)</sup>	SiC : low thermal expansion, high thermal conductivity, decrement of chemical inertness
	2) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Based composition <sup>(2)</sup>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> : low thermal conductivity, high fracture toughness, high thermal conductivity
T o l H a r d n e s s	1) Grain size control <sup>(6)</sup>	Decrement of toughness
	2) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiC whisker <sup>(1)</sup>	Decrement of chemical inertness
	3) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC whisker <sup>(6)</sup>	Insufficient fracture toughness
W e a r C h e m i c a l i n e r t n e s s	Chemical reaction of SiC, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> with Fe	Ref. (7)
W e a r T h e r m a l l y i n d u c e d w e a r	Wear caused by thermal shock <sup>(8)</sup>	Depth of cut notch (d.o.c. notch)

의 파괴저항과 마멸저항을 증가시키기 위한 연구 결과들이 발표되었는데 이를 각 특성별로 분류하면 표 1과 같다. 이 표에서 알 수 있듯이 세라믹 공구의 단점인 낮은 인성을 증가시키기 위해 세라믹 공구로 가장 많이 사용되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 다른 성질을 갖는 세라믹들을 섞거나 고용체를 만드는 방법이 소개되었다.<sup>(5)</sup> 낮은 열팽창계수의 높은 열전도율을 갖는 SiC를 휘스커(whisker) 모양의 형태로 섞어서 인성을 높인 SiC-whisker공구는 Ni 계 합금 Inconel 718을 절삭하는데 가장 많이 사용된다.<sup>(1)</sup>

다른 방법으로 ZrO<sub>2</sub>를 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 섞는 방법이 있는데 ZrO<sub>2</sub>는 응력을 받으면 결정구조가 정방정계에서 단사정계로 변화하면서 부피가 팽창하고 결

과적으로 압축응력을 형성하게 되므로 공구의 파괴저항을 향상시킨다.<sup>(2, 3)</sup> 또한 경도는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 비해 떨어지나 적은 영률과 열팽창율, 높은 파괴인성의 특성을 갖는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 Si대신 Al, N대신 O를 치환시켜 인성을 더욱 증가시킨 SiAlON도 개발되었다.<sup>(1)</sup> SiAlON의 단점은 낮은 경도 때문에 flank wear가 과도하게 발생하는 것이다.

TiC는 경도가 크고 열팽창계수가 높다. 일반적으로 높은 열팽창계수를 갖는 물질은 열충격에 약한 경향을 보이나 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 같이 팽창이 적은 물질에 TiC를 섞음으로써 열을 받을 때 서로 다른 열팽창율로 응력을 발생시켜 파괴인성을 증가시키는 방법도 개발되었다.<sup>(4)</sup>

세라믹공구를 초경공구와 비교할 때 갖는 단점 중의 하나가 낮은 열충격저항이다. 열충격저항은

$$\frac{\sigma a}{aE} \quad (\sigma: \text{열전도율 } a: \text{파괴인성 } \alpha: \text{열팽창율 } E: \text{영률})$$

로 표시되는데, 세라믹의 경우 초경공구에 비하여 열전도율과 파괴인성은 낮고 열팽창율과 영률은 크기 때문에 열충격저항이 낮게 나타난다. 결과적으로 세라믹공구는 초경공구에 비하여 열충격에 의한 파괴가 많이 발생한다. 열충격저항을 늘리기 위해서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 높은 열전도율과 낮은 열팽창율을 갖는 SiC를 섞는 방법<sup>(1)</sup>, 기본적으로 낮은 열전도율과 높은 파괴인성, 높은 열전도율의 특성이 있는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 모재로 사용한 세라믹 공구를 만드는 방법<sup>(2)</sup> 등이 소개되었다. 하지만, SiC와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>는 둘 다 Fe와 반응하는 성질이 있어 화학적 안정성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

열충격에 의한 공구파괴 순서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC whisker > Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>순서로 나타난다.<sup>(7)</sup> 이는 위에서 소개한 열충격저항  $\frac{\sigma a}{aE}$ 의 역순에 비례하는데 이로써 열충격과 공구파괴는 밀접한 관계에 있는 것을 알 수 있다.

세라믹 공구는 초경공구에 비해 내 마멸성이 뛰어난데, 그 이유는 세라믹 공구는 경도가 뛰어나고 화학적으로 안정되어 있기 때문이다. 하지만 경도와 화학적 안정성 이외에도 세라믹공구의 마멸에서 고려되어야 할 사항이 있다. 세라믹 공구에서 발생하는 마멸의 종류에는 굽힘마멸(abrasive wear), 확산마멸(diffusion wear), 화학적 마멸(chemical wear), 절삭깊이 마멸(depth of cut wear) 등이 있는데, 굽힘 마멸은 경도와, 화학적 마멸과

확산 마멸은 공구소재의 화학적 안정성과, 절삭 깊이가 마멸은 열충격량과 각각 관계가 있다.

굽힘 마멸을 감소시키려면 경도를 증가시켜야 한다. 경도를 증가시키는 방법으로는 결정립의 크기를 조정하는 방법<sup>(5)</sup>, SiC나 TiC를 섞는 방법<sup>(1,6)</sup> 등이 있다. 하지만 이런 방법들은 인성이나 화학적 안정성을 감소시키기 때문에<sup>(1, 5)</sup> 그 한계를 명확히 하여야 한다. 건식 가공에서 회주철 가공시 마멸량의 크기는  $Si_3N_4 > Al_2O_3 > Al_2O_3/SiC$  whisker  $> Al_2O_3/TiC$ 의 순서로 나타나는데, 이는 경도 순서의 역순이다. 단지  $Al_2O_3/SiC$  whisker공구의 경우 최고의  $Al_2O_3/TiC$ 보다 높은 경도를 갖고 있으면서도 마멸량이  $Al_2O_3/TiC$  공구에 비하여 큰 것은 SiC 성분이 Fe와 반응을 하여 화학적인 마멸량이 크기 때문이다.

화학적 반응에 의한 마멸은 주로 SiC나  $Si_3N_4$ 를 포함하는 세라믹 공구에서 발생하는데 그 이유는 SiC와  $Si_3N_4$ 가 Fe와 반응하기 때문이다. 이런 이유 때문에  $Al_2O_3/SiC$  whisker 공구는 Ni 계 합금이 Inconel 718을 절삭하는데 최고의 성능을 나타내지만, 회주철을 절삭할 때는 높은 경도에도 불구하고  $Al_2O_3/TiC$ 보다 마멸량이 크다.

열에 의한 마멸은 절삭깊이가 마멸이 있는데 이것은 절삭하는 공작물의 표면과 공구가 만나는 지점에서 발생한다. 공구의 끝단에서 절삭깊이가 마멸이 발생하는 부분까지의 길이가 depth of cut의 깊이와 같으므로 절삭깊이가 마멸라 불리는 이 마멸은 공구에서 절삭에 참여하는 부분과 참여하지 않는 부분의 경계로 커다란 온도 차이 때문에 발생하게 된다. 이 온도 차이는 열충격의 차이를 유도하고 결과적으로 공구는 열응력을 계속 받게 되어 마멸이 발생하게 된다. 이는 세라믹공구가 열충격에 의하여 파괴가 발생하는 것과 같은 원리이다.

이 논문에서는 낮은 열팽창계수와 높은 열전도율의 특성을 갖는 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료의 성분비를 조절하고 소결시간변화로 미세구조를 제어한 후 각 재료의 기계적인 특성을 측정하였다. 이 복합재료들의 절삭공구로써의 가능성을 다음 논문에서 절삭실험을 통하여 결정하였다.

## 2. SiC-based 복합재료의 조성 및 소결

$\beta$ -SiC (Ibiden Co., Ltd. Nagoya, Japan, grade Ultrafine)와  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Ube Industries, Tokyo, Japan,

grade E10) 그리고 TiC(grade: D.A.S, H. C. Starck, Berlin, Germany)분말을 출발분말로 사용했다. Oxynitride 조성을 준비하기 위해 SiO<sub>2</sub>(Reagent Grade, Kanto Chemical Co., Inc., Tokyo, Japan), MgO (High-Purity Grade, Wako Pure Chemical Industries, Ltd., Osaka, Japan), Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.9% pure, Shin-Etsu Chemical Co., Tokyo, Japan), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.9% pure, Sumitomo Chemical Co., Tokyo, Japan), AlN (Grade F, Tokuyama Soda Co., Tokyo, Japan) 분말들을 ball milling으로 미리 혼합했다. 이 조성은 고온에서 탄화규소의 용해도를 가지며, 결정화하기 쉬운 조성이다.

Table 2에 나와있는 조성으로 분말들을 조합하여 준비하였다. 각각의 원료조합은 탄화규소 볼과 polyethylene 병을 사용하여 에탄올을 용매로 24시간 동안 습식 혼합한 후, 슬러리를 건조시키고 과립화 과정을 거쳤다. 이렇게 준비된 분말을 일축 가압소결 하였다. 소결조건은 Table 3에 나타내었다. 소결밀도는 Archimedes 방법을 사용하여 측정하였고, 각 시편의 이론밀도는 혼합법칙(rule of mixture)을 사용하여 계산하였다 (powder G의 이론밀도는 3.18g/cm<sup>3</sup><sup>(9,10)</sup>을 사용하였다).

소결한 시편들을 자르고 연마하여, CF<sub>4</sub>와 7.8% O<sub>2</sub>의 혼합가스로 플라즈마 에칭을 하여 주사전자현미경 (SEM)을 사용하여 미세구조를 관찰하였다. Fig.1~6은 SiC-based 복합재료의 소결 후 미세조직을 보여주고 있다. SC1은  $\beta$ -SiC를 출발 원료로 하여서 열처리 중에  $\beta \rightarrow \alpha$ 로의 상변태를

Table 2 Composition of SiC-based Ceramics

Sample	Composition (wt.%)					
	SiC	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	G*	TiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
SC1	90				4.5	5.7
ST3	60			30	4.5	5.7
SCN1	20	72	8			
SCN2	20	72	8			
SCN4	20	72	8			
SCN8	20	72	8			

\*G: Y<sub>0.124</sub>Mg<sub>0.160</sub>Si<sub>0.414</sub>Al<sub>0.302</sub>O<sub>1.4</sub>N<sub>0.151</sub>

Table 3 Fabrication conditions of SiC-based ceramics

Sample	Fabrication conditions (Hot-pressing/Annealing)
SC1	1780°C, 1 h, 25 MPa/1930°C, 3 h
ST3	1820°C, 1 h, 25 MPa/1930°C, 3 h
SCN1	1780°C, 1 h, 25 MPa
SCN2	1780°C, 2 h, 25 MPa
SCN4	1780°C, 4 h, 25 MPa
SCN8	1780°C, 8 h, 25 MPa

통해 길게 자란 입자들로 구성된 미세구조를 나타내고 있고 ST3은 60 wt%β-SiC와 30 wt% TiC를 출발원료로 하여 열처리 중에 β-SiC의 β → α로의 상변태를 통해 길게 자란 입자들과 그 주변에 기지상처럼 존재하는 TiC로 구성된 미세구조를 보여주고 있다. SCN1,2,4,8은 등방성의 SiC 결정립들과 비교적 길게 자란 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 결정립들이 잘 분산된 미세조직을 보여 준다. 일축가압 소결동안 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 α → β 상변태는 길게 자란 β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 결정립 성장을 일으켰으나, SiC의 β → α 상변태는 비교적 낮은 소결온도와 nitrogen을 포함한 액상 때문에 억제되었다.<sup>(11)</sup> 이러한 길게 자란 입자들로 구성된 미세구조는 기계적 성질을 향상시키는 것으로 보고되고 있다. SiC와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 결정립크기는 소결 시간에 따라 영향을 받는다. 소결 시간이 증가할수록, 더 활발한 용해-재석출로 인해 미세구조내 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 결정립크기가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료에서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 결정립의 형상은 전형적인 자기복합 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 비교해 볼 때, SiC 결정립에 의해 방해받지 않아 결정립 성장이 억제되어, 침상구조가 잘 발달하지 않은 것을 관찰할 수 있다.

### 3. SiC-based 복합재료의 기계적 특성

Table 4는 SiC-based 복합재료의 특성을 보여준다. SiC 단일재료인 SC1이 가장 높은 경도를 가졌고, SiC-TiC 복합재료인 ST3가 가장 높은 파괴인성을 가졌다. SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료인 SCN1-8은



Fig. 1 S.E.M. micrograph of SC1 (SiC) (Sintering time : 3hr)

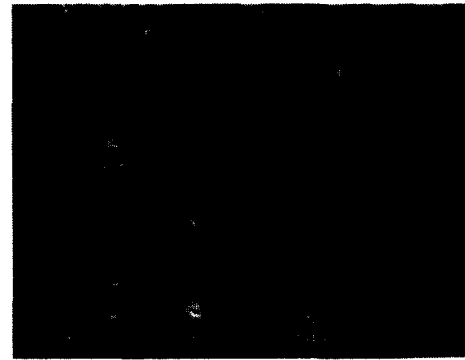


Fig. 2 S.E.M. micrograph of ST3(SiC-TiC) (Sintering time : 3hr)



Fig. 3 S.E.M. micrograph of SCN1(SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (Sintering time : 1hr)



Fig. 4 S.E.M. micrograph of SCN2(SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (Sintering time : 2hr)

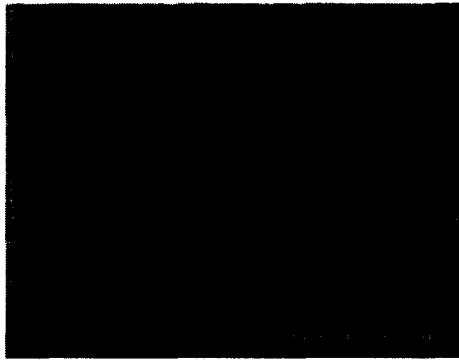


Fig. 5 S.E.M. micrograph of SCN4(SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (Sintering time : 4hr)



Fig. 6 S.E.M. micrograph of SCN8(SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (Sintering time : 8hr)

0.7에서 1.0GPa로 분포되는 강도를 갖고 있는데 이 중 SCN4가 1.0GPa로 가장 높은 강도를 가졌다. 절삭공구에서는 상온강도보다도 고온강도가 중요하다. 절삭조건에 따라 공구-공작물 접촉 지점에서의 온도는 800-1000°C까지 상승하기 때문이다. 그런데, 900°C에서의 SiC-based 복합재료의 고온강도는 상온에서의 고온강도와 거의 차이가 없는 것으로 이미 밝혀졌다.<sup>112)</sup> 그러므로, 표 4에서 주어진 상온강도는 공구절삭 시의 강도와 유사할 것으로 추정된다. 이 재료들로 제작된 공구의 수명이 표 5, 6에 주어졌다. 표 5에서 SC1과 ST3는 절삭과 동시에 파손이 발생하였는데 이는 SiC 소재의 강과의 화학적 작용에 의한 것으로 보인다. 표 6에서는 표 5에서 가장 좋은 절삭성능을 보인 SCN4와 SCN8을 선정하여 회주철을 절삭하였는데 결과적으로 SCN8이 가장 좋은 절삭성능을 나타내었다. 더 자세한 내용은 part 2에서 다루어질 예정이다. Fig. 7은 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료에서 열처리 시간에 따른 파괴인성의 변화를 보여주는데, 열처리 시간이 증가함에 따라 파괴인성이 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig.3-6에서 보여주듯이 열처리 시간이 증가함에 따라 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 입자의 결정립이 성장하여, 현장인화 복합재료의 미세구조가 발달하기 때문이다. 따라서 공정변수의 최적화로 미세구조를 제어함으로써 추가적인 파괴인성 향상이 가능할 것으로 생각된다.

Fig. 8은 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료에서 경도와 소결 밀도와의 관계를 보여주는데, 소결체의 밀도가 증가함에 따라 경도도 거의 일정함을 알 수 있다.

Table 4 Properties of SiC-based ceramics

Sample	Fracture Toughness (MPa·m <sup>1/2</sup> )	Hardness (kg/mm <sup>2</sup> )	strength (GPa)	Bulk Density (%)
SC1	5.3	1935	0.49	3.183
ST3	6.4	1631	0.59	3.580
SCN1	4.4	1630	0.71	3.140
SCN2	4.7	1645	0.70	3.154
SCN4	4.9	1673	1.00	3.175
SCN8	5.5	1674	0.85	3.177

Table 5 Tool life of SiC based ceramics during machining heat treated SCM440 (Cutting Speed: 160m/min., feedrate=0.2mm/rev., depth of cut=0.25mm, tool life criterion: flank wear land length=0.3mm)

Sample	SC1	ST3	SCN1	SCN2	SCN4	SCN8
Tool Life	*	*	26sec.	42sec.	49sec.	60sec.

\* Failed before flank wear land length reaches 0.3mm

Table 6 Tool life of SCN4 and SCN8 during machining gray cast iron (Cutting Speed: 330m/min., feedrate=0.3mm/rev., depth of cut=0.25mm, tool life criterion: flank wear land length=0.3mm)

Sample	SCN4	SCN8
Tool Life	49sec.	60sec.

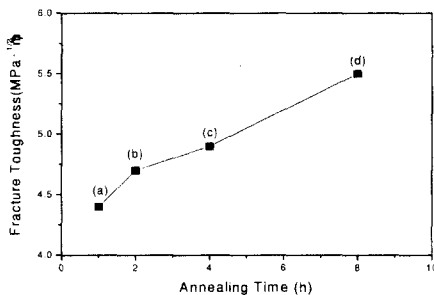


Fig. 7 Fracture Toughness versus annealing time of the (a) SCN1, (b) SCN2, (c) SCN4, and (d) SCN8

이는 입자크기가 1 μm 정도 영역에서는 경도가 미세구조와 입자크기 그리고 밀도에 의존하지 않고, 일정함을 보여준다.

이러한 결과는 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료에서 경도의 손실 없이 파괴인성을 추가로 증가시킬 수 있는 가능성을 제시하는 것이다.

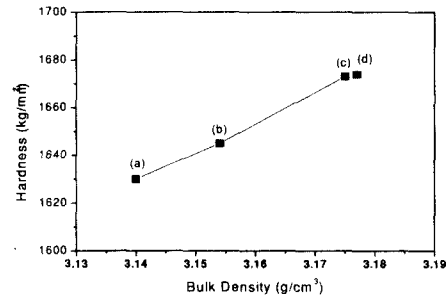


Fig. 8 Hardness versus bulk density of the (a) SCN1, (b) SCN2, (c) SCN4, and (d) SCN8

#### 4. 결론

고성능 절삭공구용 세라믹스를 개발하기 위하여 6종의 SiC계 복합재료를 제조하여 미세구조를 관찰하고, 기계적특성을 측정하였다. 본 연구에서 조사한 6종의 재료 모두 현장인화 복합재료형 미세구조를 나타내었다. SiC계 단일세라믹스인 SC1이 1935 kg/mm<sup>2</sup>의 가장 높은 경도를 나타내었고, SiC-TiC 복합재료인 ST3가 6.4 MPa·m<sup>1/2</sup>으로 가장 높은 파괴인성을 나타내었다. SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료에서는 열처리 시간이 증가함에 따라 파괴인성이 증가하는 결과를 나타내었다.

#### 후 기

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음 (KRF-99-042-E00133).

#### 참고문헌

1. Elizabeth, R., etc. "Machining with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-Whisker Cutting Tools," Ceram. Bull., Vol. 67, No. 6, pp. 1016-1019, 1988.
2. Whitney, E. D., Vaidyanathan, P. N., "Microstructural Engineering of Ceramic Cutting Tools," Ceram. Bull., Vol. 67, No. 6, pp. 1010-1014, 1988.
3. Kerkwijk, B. J., Buizert, J.C., and Verweij, H.,

- "Tribological Tests Verify Wear resistance," Am. Ceram. Soc. Bull., pp. 49-53, Vol. 79, No. 1, 2000.
4. Szafran, M., Boyryk, E. D., Olszyna, K. A.,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$  composites intended for the edges of cutting tools," Ceram. Inter., Vol. 26, pp. 579-582, 2000.
  5. Krell, A., Blank, P., Berger, L.-M., Richter, V., "Alumina Tools for Machining Chilled Cast Iron, Hardened Steel," Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 78, No. 12, pp. 65-73, 1999.
  6. Bordue, D., "Hard Part Machining with Ceramic Inserts," Ceram. Bull., Vol. 67, No. 6, pp. 998-1001, 1988.
  7. Wayne, S. F., Buljan, S.-T., "The Role of Thermal Shock on Tool Life of Selected Ceramic Cutting Tool Material," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 72, No. 5, pp. 754-760, 1989.
  8. Tonshoff, H. K., Bartsch, S., "Wear Mechanism of Ceramic Cutting Tool," Ceram. Bull., Vol. 67, No. 6, pp. 1020-1025, 1988.
  9. Kim, Y.-W., Mitomo, M., "Fine-Grained Silicon Carbide ceramics with Oxynitride Glass," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 82, No. 10, pp. 2731-2736, 1999.
  10. Kim, Y.-W., Mitomo, M., Zhan, G. D., "Mechanism of Grain Growth in Liquid-Phase-Sintered  $\beta$ -SiC," J. Mater. Res., Vol. 14, No. 11, pp. 4291-4293, 1999.
  11. Kim, Y.-W., Lee, Y. I., Mitomo, M., "Fabrication and Mechanical Properties of Silicon Carbide-Silicon Nitride Composites with Oxynitride Glass," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 82, No. 4, pp. 1058-1060, 1999.
  12. Cho, Duk-ho, Kim, Young-wook, Kim Wonjoong, "Strength and fracture toughness of in situ-toughened silicon carbide," J. Mater. Sci., Vol. 32, pp. 4777-4782, 1997.