

## SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹 절삭공구의 미세구조 및 절삭특성

권 원 태\* · 김 영 욱\*

(2001년 1월 6일 접수, 2001년 10월 8일 심사완료)

### Microstructure and Cutting Characteristics of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramic Cutting Tool

Won Tae Kwon and Young-Wook Kim

**Key Words:** SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramic Cutting Tool(탄화규소-질화규소 세라믹 절삭공구), Microstructure(미세구조), Fracture Toughness(파괴인성), Tool Life Curvature(공구수명곡선), Cutting Force(절삭력)

#### Abstract

Four SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tools with different composition have been fabricated by hot-pressing. Correlations among the annealing time, the corresponding microstructure and the mechanical properties of resulting ceramics have been investigated. The fracture toughness and the grain size of both SiC and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites increased with the annealing time. The hardness of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites was relatively independent of the grain size and the sintered density. These ceramic cutting tools were tested under various cutting conditions and compared with the commercial Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tools. The experimental results were compared in terms of tool life and cutting force. The performance of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tool shows the possibility to be a new ceramic tool.

#### 1. 서 론

세라믹공구의 파손은 주로 인성과 열충격저항의 부족에 기인하고 마멸은 경도, 화학적 안정성, 그리고 열충격저항에 기인한다. 파손과 마멸에 동시에 영향을 주는 열충격저항은 세라믹공구의 취약점인데 이는 초경공구나 고속도강과는 달리 세라믹은 열전도성이 낮고 열팽창률이 높으며 영률(Young's Modulus)이 높기 때문이다. 즉 낮은 열전도성으로 인하여 열 집중이 발생하고 이는

인접한 지역과 높은 온도 차이로 나타난다. 세라믹은 열팽창률이 높기 때문에 인접한 지역끼리의 높은 온도차이는 높은 열팽창률의 차이로 나타나고 결국 심한 열응력이 발생한다. 이 열응력의 크기는 절삭시 발생하는 인장력의 크기보다 커서 공구가 파괴되는 원인이 되거나,<sup>(1)</sup> 열에 의한 마멸 발생으로 나타난다.<sup>(2)</sup> 열응력에 의한 파손과 마멸을 줄이기 위하여 열 팽창률이 적고 열 전도율이 좋은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 모재로 공구를 만들거나,<sup>(3)</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>공구에 열팽창률이 적고 열전도율이 좋은 SiC를 섞는 방법이 제시되었다.<sup>(4)</sup>

본 논문은 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료로 만들어진 절삭공구특성에 대하여 연구하였다. SiC는 인성과 경도가 다른 세라믹공구에 비해 작기 때문에 경도가 높은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 혼합하고 소결시간변화로 미세구조를 제어한 후 각 재료의 기계적 특성과 절삭

\* 책임저자, 회원, 서울시립대학교 기계정보공학과

E-mail : kwon@uos.ac.kr

TEL : (02)2210-2403 FAX : (02)2248-5110

\* 서울시립대학교 재료공학과

성능을 평가하였다. 성능비교를 위하여 고경도 공작물 가공에 탁월한 성능을 보이는 상용 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 공구로 열처리된 SCM440구조강을 절삭하면서 공구수명이 가장 긴 절삭조건을 선정하였다. 이 절삭조건에서 현재 개발 중인 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹 공구와 상용 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>공구의 절삭 성능과 비교하였다.

## 2. SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 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) 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 볼밀(ball mill)로 미리 혼합했다. 이 조성은 고온에서 탄화규소의 용해도를 가지며, 결정화하기 쉬운 조성이다.

Table 1에 나와있는 조성으로 분말들을 조합하여 준비하고 일축가압소결 하였다. 각각의 원료조합은 탄화규소 볼과 폴리에틸렌병을 사용하여 에탄올을 용매로 24시간 동안 습식 혼합한 후, 슬러리를 건조시키고 파립화 과정을 거쳤다. 소결 밀도는 아르키메데스 방법을 사용하여 측정하였고, 각 시편의 이론밀도는 혼합비율을 사용하여 계산하였다 (powder G의 이론밀도는 3.18g/cm<sup>3</sup><sup>5,6</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 미

세구조를 관찰하였다. 각 샘플은 Si, C, N의 조성을 가지므로 SCN이라 명명하였으며 뒤에 붙은 숫자는 소결시간을 의미한다. Fig. 1~Fig. 4는 SCN 복합재료의 소결시간변화에 따른 미세조직 사진이다. 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  $\alpha \rightarrow \beta$  상변태는 길게 자란  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 결정립 성장을 일으켰으나, SiC의  $\beta \rightarrow \alpha$  상변태는 비교적 낮은 소결온도와 질소를 포함한 액상 때문에 억제되었다.<sup>(7)</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 않는 것을 관찰할 수 있다.

## 3. SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료의 기계적 특성

Table 2는 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료의 특성을 보인다. 파괴인성은 비커스시험기를 이용하여 측정하였다. 각 시편에 압하중을 9.8~294N 으로 변화시키면서 가한 후, 생성된 크랙의 길이를 측정함으로써 파괴인성을 추정하였다.<sup>(7)</sup> Fig. 5에서 알 수 있듯이, 열처리 시간이 증가함에 따라 파괴인성도 증가한다. 이러한 결과는 Fig. 1~Fig. 4에서 보듯이 열처리 시간이 증가함에 따라 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 입자의 결정립이 성장하여, 현장인화 복합재료의 미세구조가 발달하기 때문이다. 일반적으로 세라믹공구에서 미세조직이 조대해지면 파괴인성이 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>(8)</sup>

따라서 공정변수의 최적화로 미세구조를 제어함으로써 추가적인 파괴인성 향상이 가능할 것으로 생각된다. Fig. 6은 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료에서 경도와 소결밀도와의 관계를 보여주는데, 소결체의 밀도가 증가함에 따라 경도가 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그래프상으로는 약간 선형적으로 증가하는 것으로 보이나 약 25kg/mm<sup>2</sup> 정도의 표준편차를 고려하면 일정하다고 할 수 있다. 이는 입자크기가 약 1 $\mu$ m 정도 영역에서는 경도가 미세

Table 1 Composition of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics

| Sample | Composition (wt.%) |                                |    | Fabrication Conditions |
|--------|--------------------|--------------------------------|----|------------------------|
|        | SiC                | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | G* |                        |
| SCN1   | 20                 | 72                             | 8  | 1780°C, 1 h, 25 MPa    |
| SCN2   | 20                 | 72                             | 8  | 1780°C, 2 h, 25 MPa    |
| SCN4   | 20                 | 72                             | 8  | 1780°C, 4 h, 25 MPa    |
| SCN8   | 20                 | 72                             | 8  | 1780°C, 8 h, 25 MPa    |

\*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>

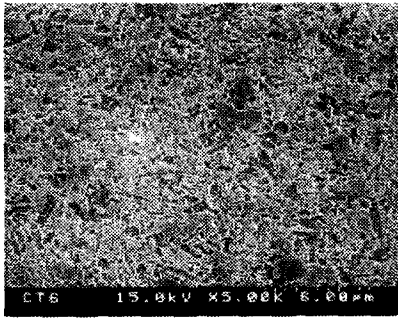


Fig. 1 S.E.M. micrograph of SCN1(SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (Sintering time: 1hr)

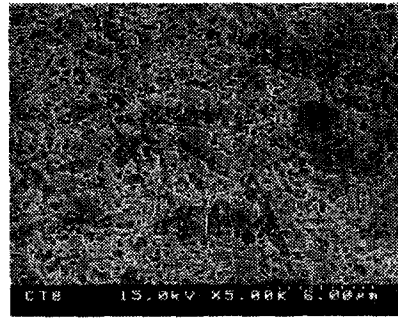


Fig. 4 S.E.M. micrograph of SCN8(SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (Sintering time: 8hr)

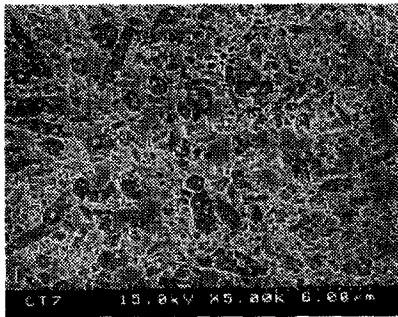


Fig. 2 S.E.M. micrograph of SCN2(SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (Sintering time: 2hr)

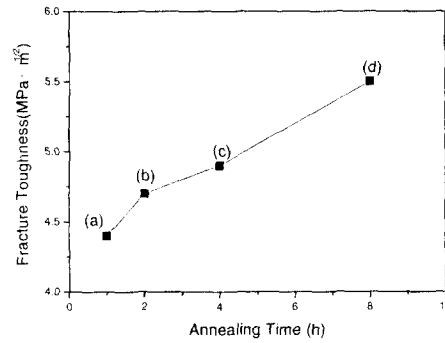


Fig. 5 Fracture Toughness versus annealing time of the (a) SCN1, (b) SCN2, (c) SCN4, and (d) SCN8

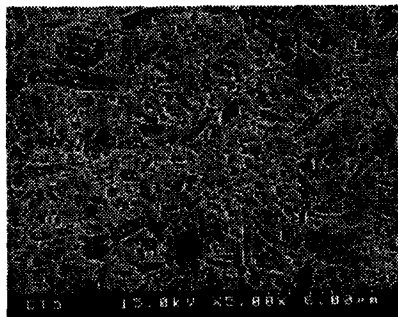


Fig. 3 S.E.M. micrograph of SCN4(SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (Sintering time: 4hr)

Table 2 Properties of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics

| Sample | Fracture Toughness (MPa·m <sup>1/2</sup> ) | Hardness (kg/mm <sup>2</sup> ) | Bulk Density (%) |
|--------|--|--------------------------------|------------------|
| SCN1   | 4.4  | 1630                           | 3.140            |
| SCN2   | 4.7  | 1645                           | 3.154            |
| SCN4   | 4.9  | 1673                           | 3.175            |
| SCN8   | 5.5  | 1674                           | 3.177            |

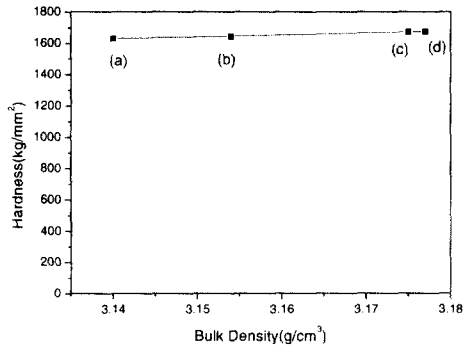


Fig. 6 Hardness versus bulk density of the (a) SCN1, (b) SCN2, (c) SCN4, and (d) SCN8

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

#### 4. SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 절삭특성

##### 4.1 실험장치 및 방법

절삭특성 비교시험에 사용된 공구는 상용제품인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(AS10, Taegu Tec) 공구이다. 절삭가공 시험에 사용한 공작기계는 선반이며, 각 절삭공구의 규격은 SNGN 120416이다. 홀더는 Taegu Tec사의 CSDNN 2525M 12CEA를 사용하였고, 이때 절입각은 45° 였다. 절삭깊이 0.25mm, 절삭속도 160m/min, 이송량 0.2mm/rev. 절삭조건하에 열처리한 SCM440(AISI4140)을 건식절삭하였다. Instron사 Rockwell Series 600 경도시험기를 사용하여 측정된 결과 열처리한 SCM440의 경도는 HRC 58로 측정되었고 열처리 깊이를 고려하여 3mm 깊이를 절삭후 다시 열처리 하여 사용하였다. 건식 절삭으로 하여 각 공구간의 피삭재에 따른 마멸특성을 비교하였다. 또한, 자동차 브레이크에 많이 사용하는 회주철(FC 25)을 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 추천 절삭조건 (절삭속도 200~500m/min, 이송량 0.3~0.8mm/rev) 중 하나인 절삭속도 330m/min, 이송량 0.3mm/rev의 조건에서도 절삭시험을 행하였다. 각 절삭조건에서 공구의 손상은 절삭한 공구의 플랭크면 평균 마멸량으로 평가하였으며,

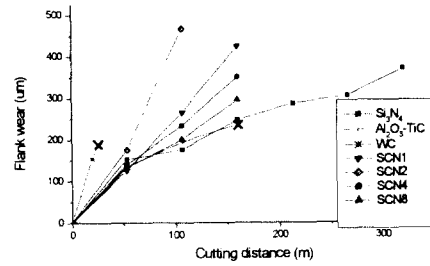


Fig. 7 Flank wear curve of various inserts during machining heat treated SCM440 (Cutting speed =160m/min, feedrate=0.2mm/rev, depth of cut = 0.25mm)

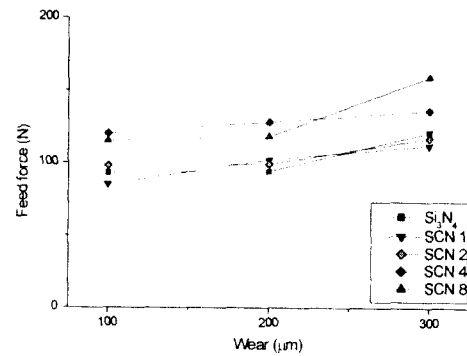


Fig. 8 Feed force variations during machining heat treated SCM440 (Cutting speed =160m/min, feed rate = 0.2mm/rev, depth of cut = 0.25mm)

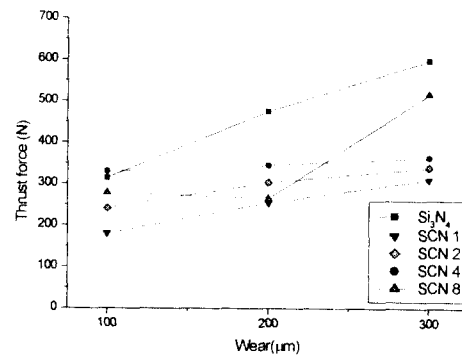
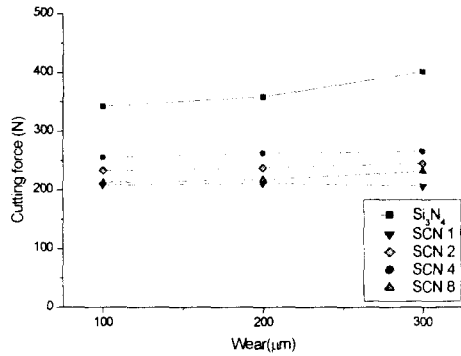
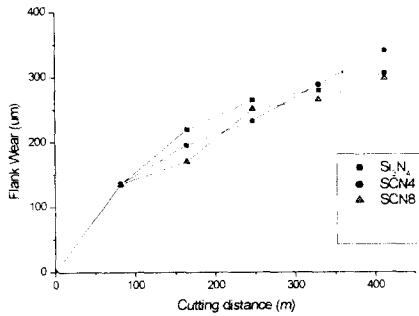


Fig. 9 Thrust force variations during machining heat treated SCM440 (Cutting speed=160m/min, feed rate = 0.2mm/rev, depth of cut = 0.25mm)



**Fig. 10** Cutting force variations during machining heat treated SCM440 (Cutting speed=160m/min, feed rate = 0.2mm/rev, depth of cut = 0.25mm)



**Fig. 11** Flank wear curves of various tools with cutting distance in the machining of gray cast iron (Cutting speed=330m/min, feed rate=0.3mm/rev, depth of cut = 0.25mm)

마멸량은 공구현미경을 사용하여 측정하였다. 또한 절삭 시험동안의 절삭력 측정을 위해 Kistler사의 9257B 공구동력계를 사용하였고, 측정된 절삭력은 HS-DAS 12 보드를 통해 A/D변환한 후 586PC에 저장하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

실험결과 얻어진 공구수명곡선이 Fig. 7에 주어졌다. 상대적으로 소결시간이 짧은 SCN1과 SCN2는 초기부터 급격히 마멸이 진행되어 정상적인 절삭공이 어려운 것을 알 수 있으며, 상대적으로 소결시간이 긴 SCN4, SCN8은 초기에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와

유사한 내마멸성을 나타내지만, 80m 이후로 SCN8 보다 소결 시간이 짧은 SCN4가 급격히 마멸이 된다. 각 재료의 초기마멸량이 유사한 것은 Table 2에 보여졌듯이 경도가 유사하기 때문이며 이후 소결시간 변화에 따른 공구수명의 차이는 파괴인성의 차이에 기인한다. 같은 절삭조건 하에 코팅 초경공구(TT2500, Taegu Tec.)와 상용 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC 공구(AB30, Taegu Tec.)를 사용한 결과도 보여졌다. 그림에서 알 수 있듯이 초경공구 절삭 개시 후 곧 파괴되었고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC공구는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 유사한 마멸 특성을 보이다가 급작스럽게 파괴되었다. 이는 열전도율이 낮은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>공구가, 경도가 높은 공작물을 절삭할 때 발생하는 높은 열에 의한 열충격을 견디지 못해서 생기는 현상으로 추정된다. Fig. 8부터 Fig. 10까지는 절삭속도 160m/min, 절삭깊이 0.25mm, 이송량 0.2mm/rev의 조건에서 절삭할 때, 절삭력의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 공통적으로 배분력이 가장 크게 나타남을 알 수 있는데 이는 세라믹 공구의 공구각이 음의 경사각을 갖기 때문이다. 그러므로 세라믹 공구 제작 시 결정립의 성장 방향을 배분력 방향과 수직으로 성장하도록 설계해야 배분력으로 인한 박리 현상을 최소화할 수 있다. 또한 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 공구들의 절삭력이 이송력의 경우 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>공구의 이송력과 유사하지만, 배분력과 접선방향 절삭력은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>공구의 경우보다 상당히 작은 것을 알 수 있다. 이는 공구와 공작물 간의 마찰력의 차이에 기인한 것으로 추정된다.

Fig. 11은 열처리한 SCM 440보다 경도가 낮은 회주철(경도180~250HB)을 피삭재로 한 절삭속도 330m/min, 절삭깊이 0.25mm, 이송량 0.3mm/rev의 조건에서 절삭실험을 한 결과이다. SCN8보다 소결시간이 짧은 SCN4는 130m 이후 급속한 마멸을 보이지만, 소결시간이 더 긴 SCN8은 오히려 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>보다 약간 더 마멸량이 적은 것을 볼 수 있다.

5. 결론

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>공구와 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>계 세라믹 공구를 열처리한 SCM 440을 공작물로 하여 절삭특성을 비교,

검토하기 위해, SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹 공구를 제조하여 기계적 성질을 평가하고, 선삭 가공에 있어서 절삭조건별 각 공구의 절삭특성에 대하여 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료에서 소결시간을 달리한 4종 모두 현상인화 복합재료형 미세구조를 나타내었다.

(2) SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료의 경도는 입자크기가 1mm 이내에서 밀도와 관계없이 거의 일정하였다. 이로써 소결시간의 조절로 파괴인성을 증가시킬 수 있음을 보였다.

(3) SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료는 열처리 시간이 증가할수록 공구수명이 늘어나는 절삭특성을 보이고 있는데, 이는 파괴인성의 증가때문으로 추측된다.

(4) 절삭력분석결과 세라믹 공구의 경우 배분력이 가장 크므로, 세라믹공구의 결정방향이 배분력과 수직인 방향으로 성장하는 것이 유리하다는 것이 밝혀졌다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Steven, F. W. and Sergel-Tomislav Buljan, 1989, "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.
- (2) Hans K. T. and SVEN B., 1988, "Wear Mechanism of Ceramic Cutting Tool," *Ceram. Bull.*, Vol. 67, No. 6, pp. 1020-1025.
- (3) Szafran M., Boyryk E. D., and Olszyna, K. A., 2000, "Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites Intended for the Edges of Cutting Tools," *Ceramics international* 26, PP. 579-582.
- (4) Elizabeth R.B., Pankaj K.M., Albert F.S., and Craig W.B., 1988, "Machining with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-Whisker Cutting Tools," *Ceram. Bull.*, Vol. 67, No. 6, pp. 1016-1019.
- (5) Kim, Y.-W. and Mitomo, M., 1999, "Fine-Grained Silicon Carbide ceramics with Oxynitride Glass," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, No. 10, pp. 2731-2736.
- (6) Kim, Y.-W., Mitomo, M. and Zhan, G. D., 1999, "Mechanism of Grain Growth in Liquid-Phase-Sintered β-SiC," *J. Mater. Res.*, Vol. 14, No. 11, pp. 4291-4293.
- (7) Kim, Y.-W., Lee, Y. I and Mitomo, M., 1999, "Fabrication and Mechanical Properties of Silicon Carbide-Silicon Nitride Composites with Oxynitride Glass," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, No. 4, pp. 1058-1060.
- (8) 안동길, 윤명진, 2000, "절삭공구용 세라믹의 소결조직에 따른 파괴인성과 경도의 평가," 한국공작기계학회지, 제9권, 제6호, pp. 170-177.