

절삭 공구용 세라믹의 소결조직에 따른 파괴인성과 경도의 평가

안동길*, 윤명진**

Effect of Microstructure on Evaluation of Fracture Toughness and Hardness of Cutting Tool Ceramics

Dong Gil Ahn*, Myung Jin Yoon**

Abstract

Dense Al_2O_3 -30%TiC and Si_3N_4 ceramic tool materials with various grain size were produced by sintering-HIP treatment and by gas-pressure sintering. The fracture toughness was measured by indentation fracture and indentation strength method for both ceramics with various grain size. The effect of the grain size on the fracture toughness was evaluated, and the correlation between fracture toughness and mechanical properties such as hardness, Young's modulus and flexural strength of these ceramic were also investigated. The highest fracture toughness of around $6.7MPa \cdot m^{1/2}$ was obtained in Si_3N_4 ceramics with grain size of $1.58\mu m$. With a larger grain size of Al_2O_3 -30%TiC and Si_3N_4 ceramics, the fracture toughness was generally increased. The increased fracture toughness of these ceramic also improved the flexural strength although the hardness decreased considerably. Similar results were obtained in grain size and mechanical properties on both Al_2O_3 -30%TiC and Si_3N_4 ceramic tool materials.

Key Words : cutting tool ceramics (절삭 공구용 세라믹), fracture toughness (파괴인성), mechanical property (기계적 특성), flexural strength(굽힘강도)

1. 서 론

최근 각종 금속소재의 절삭가공에 있어서 각 소재의 고경도화 및 다양화에 따라 난삭재의 가공이 늘어나고 있다. 또한 가공기술의 발전에 따라 보다 효율적인 고속가공의 요구도 점차 대두되고 있는 실정이다. 이러한 고경도 소재의 절삭가공이나 고속가공에 있어서는 고경도의 세

라믹 절삭공구가 유용하게 사용된다.^{1)~2)} 절삭공구용 세라믹 재료의 사용분야에서 공구의 수명에 직접적으로 영향을 주는 손상은 결손, 칩핑 등이며, 특히 고속가공에서의 열 충격에 의한 공구손상은 공구수명을 크게 좌우한다. 이러한 세라믹 절삭공구의 수명은 세라믹의 인성과 직접적 관련이 있다고 할 수 있다.³⁾ 세라믹 절삭공구는 초경공구에 비해 내마모성은 뛰어나지만 인성이 열세하여 세라믹

* 대한중석초경(주) 종합기술연구소
** 경일대학교 기계공학부

공구재료의 개발은 고인성화에 초점이 맞추어져 왔다. 따라서 세라믹 공구재료에서는 경도, 강도와 함께 인성을 예측할 수 있는 파괴인성의 평가가 매우 중요하다고 할 수 있다. 현재 공업화되어 있는 절삭공구용 세라믹은 Al_2O_3 계와 Al_2O_3 -TiC계⁴⁻⁵⁾ 및 Si_3N_4 계⁶⁾로 크게 대별되는데, 특히 Al_2O_3 -TiC계 및 Si_3N_4 계는 절삭성능이 우수하여 각각 고경도강 및 주철의 범용절삭에 널리 사용되고 있다. 특히 Si_3N_4 계 절삭공구는 인성이 우수하여 지금까지 적용하지 못했던 주철의 밀링가공과 습식가공에서 탁월한 성능을 나타내고 있다. 세라믹 절삭공구의 절삭성능을 예측하기 위해서는 여러 가지 기계적 특성의 평가와 함께 특히 내마모성과 내결손성을 예측할 수 있는 경도와 파괴인성값의 평가가 필요하다. 세라믹의 파괴인성값을 산출하는 방법에는 파괴역학시편을 이용한 직접적 방법이 있으나, 비교적 간단한 시험편으로 상대적 인성을 효과적으로 평가할 수 있는 압자압입(Indentation)법이 많이 사용되고 있다.⁷⁾ 또한 절삭공구용 세라믹의 중요한 절삭특성인 내마모성과 내결손성 등은 동일한 합금조성에 있어서도 공구의 형상과 소결조직에 따라 큰 차이가 나타나기 때문에 이에 적합한 인서트 형상과 조직이 요구된다. 이 중에서도 특히 세라믹 공구의 절삭특성은 세라믹의 소결조직에 의해 큰 영향을 받기 때문에 결정립 조직의 정량적 평가에 의한 각 기계적 특성의 변화에 대한 구체적 검토가 필요하지만 아직 이에 대한 연구보고는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 현재 대표적인 절삭공구용 세라믹인 Al_2O_3 -30%TiC 및 Si_3N_4 계를 고경도-고인성 재종으로 각각 합금설계한 후 제조하였다. 본 세라믹의 제조에 있어서 소결조건에 의한 소결조직의 결정립 차이와 이에 따른 각각의 기계적 특성 변화를 조사하고, 특히 인성의 변화를 압자 압입법인 IF법 및 IS법을 이용하여 파괴인성값을 구하여 비교 고찰하였다. 또한 소결조건에 따른 각 절삭공구용 세라믹의 평균입경과 밀도차이가 경도, 강도 및 탄성계수의 변화에 미치는 영향과 파괴인성과의 상관관계를 파악하여 절삭공구용 세라믹의 사용용도에 따른 조직제어의 기준을 제시하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 세라믹의 제조

본 연구에서 제조한 2종의 세라믹에 사용한 원료분말 중 Al_2O_3 분말은 일본 Sumitomo사의 평균입경 $0.3\mu m$, TiC분말은 H. C. Starck사의 평균입경 $1.5\mu m$, Y_2O_3 분말

은 H. C. Starck사의 평균입경 $1.0\mu m$, Si_3N_4 분말은 UBE사의 평균입경 $0.6\mu m$ 을 각각 사용하였다.

각각의 원료분말을 사용한 절삭공구용 Al_2O_3 -30%TiC 및 Si_3N_4 계 세라믹의 제조는 먼저, 현재 시판되고 있는 각 메이커의 절삭공구용 세라믹의 조성분석을 기초로 하여 표 1과 같은 조성으로 설계하였다.

Table 1 Chemical composition of ceramic used this study (wt%)

Toll materials	Al_2O_3	Si_3N_4	TiC	Y_2O_3
Al_2O_3 -30%TiC	67	-	30	3
Si_3N_4	2	95	-	3

각 조성의 원료분말을 지르코니아 볼과 메틸알콜을 사용하여 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)용기 내에서 Al_2O_3 -30%TiC는 48시간, Si_3N_4 는 36시간 각각 습식 밀링하여 분쇄 혼합하였다. 밀링 후 건조기에서 $80^\circ C$ 로 가열하여 건조시킨 다음, 3시간 건조 밀링하여 응집체를 분쇄한 후 400메시(mesh)로 스크린하여 최종 혼합 원료분말을 제조하였다.

제조된 원료분말을 초경금형을 이용하여 150MPa의 압력으로 직경 1cm, 높이 1cm의 실린더형 시험편과 굽힘강도 및 파괴인성 측정용 시험편을 성형하였다. Al_2O_3 -30%TiC 성형체는 발열체가 텅스텐 mesh인 진공소결로에서 $1550\sim 1750^\circ C$ 로 소결한 후, 잔류기공을 제거하여 치밀한 소결체를 얻기 위하여 소결체를 $1600^\circ C$, 150MPa의 조건으로 알곤분위기에서 30분간 HIP(Hot Isostatic Pressing)처리하였다. Si_3N_4 성형체는 소결온도 $1650\sim 1850^\circ C$, N_2 10MPa기압의 가압조건에서 1시간 소결하였다.

2.2 조직 및 기계적 특성의 평가

소결한 각 세라믹의 조직은 연마 및 에칭한 후 광학현미경과 주사 전자현미경으로 관찰하였으며, 각 소결온도에 따른 2종 세라믹의 조직은 화상해석장치(ABIONIK사-EXCEL)을 이용하여 평균입경을 구하였다. 제조된 세라믹의 기계적 특성은 경도, 굽힘강도(Flexural Strength) 및 탄성계수(Young's modulus)를 평가하였다. 시험편의 경도값은 비커스 경도계를 사용하였으며, 작용하중은 98N으로 하여 동일 시험편의 10개 부위를 반복 측정하여 최대 및 최소값을 제외한 평균값을 최종 비커스 경도값(HV)으로 정하였다. 제조된 2종 세라믹의 굽힘강도 측

정용 시험편의 규격은 3×4×40mm이며 모서리는 45°로 먼뿔하고 각 면은 3μm의 다이아몬드 연마제를 사용하여 연마한 후 3점 굽힘강도 및 IS법의 파괴인성값 측정용 시험편으로 사용하였다. 각 세라믹의 탄성계수 측정은 초음파 음속법을 이용하여 관계식으로부터 산출하였다. 즉, 등방성 고체중에 음파가 전파할 때 탄성계수, 포와송비, 종파의 음속 및 횡파의 음속간에는 다음의 수식관계가 성립된다.⁽⁸⁾

$$E = \rho v_L^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)(1 - \mu)$$

$$E = 2(1 + \mu)\rho v_T^2$$

$$\mu = \frac{v_L^2 - v_T^2}{2(v_L^2 - v_T^2)}$$

여기서, E(GPa)는 탄성계수, μ는 포와송비, ρ(kg/m³)는 소결체 밀도, v_L(m)는 종파의 음속, v_T(m)는 횡파의 음속이고 종파 및 횡파의 음속은 5MHz의 초음파를 이용해서 측정하였다.

2.3 파괴인성의 평가

각 세라믹의 파괴인성은 압자 압입법⁽⁹⁾을 이용한 IF법(압입파괴법, Indentation Fracture method) 및 IS법(압입강도법, Indentation Strength method)으로 파괴인성값을 구하여 비교 평가하였다. IF법에 의한 파괴인성의 산출식은 다음과 같이 여러 연구자에 의해 제안되어 있다.⁽¹⁰⁾

Evans & Charles $K_{IC} = 0.16HVa^{1/2}(c/a)^{3/2}$
 $K_{IC} = 0.0732(E/HV)^{0.4}HVa^{1/2}(c/a)^{3/2}$

Lawn, Evans & Marshall
 $K_{IC} = 0.028(E/HV)^{0.5}HVa^{1/2}(c/a)^{-3/2}$

Evans $K_{IC} = Y10^4(E/HV)^{0.4}HVa^{1/2}Y$

Niihara, Morena & Hasselman
 $K_{IC} = 0.067(E/HV)^{0.4}HVa^{1/2}(c/a)^{-3/2}$
 ---(m. c)
 $K_{IC} = 0.018(E/HV)^{0.4}HVa^{1/2}(c/a)^{1/2}$
 ---(p. c)

여기서, E는 소결체의 탄성계수, HV는 비커스 경도, a는 비커스 압흔의 중심에서 모서리까지 길이의 평균값, c는 비커스 압흔의 중심에서 균열(crack) 선단까지의 평균길이이다.

위의 파괴인성값의 평가식들은 주로 메디안 균열(median crack)이 발달한 경우에 적용되지만, 비교적 인성이 높거나 압입하중이 낮은 경우에는 표면형 균열(Palmqvist

crack)이 발생한다. 본 연구에서는 초경합금 및 세라믹등 경질재료의 인성평가에 자주 이용되는 Niihara⁽¹⁰⁾의 표면형 균열식을 이용하여 동일조건으로 표면을 연마한 각 소결체에 대하여 196N의 하중으로 10초간 10회이상 비커스 하중을 가한 후, 최소값과 최대값을 제외한 HV, a 및 c의 평균값과 소결체의 탄성계수값으로부터 파괴인성값(K_{IC})을 산출하여 각 세라믹의 인성을 비교하였다. 한편 IS법은 도입한 크랙의 길이를 직접 측정하지 않고 시험편의 굽힘강도와 압입하중으로부터 아래의 식을 사용하여 파괴인성값을 산출하였다.⁽⁷⁾

$$K_{IC} = 0.59(E/H)^{1/6}(\sigma_f P^{1/3})^{3/4}$$

여기서 P는 비커스 압자의 압입하중, σ_f는 도입크랙을 가진 시험편의 굽힘강도를 나타낸다. 이 방법은 압입크랙의 길이를 직접 측정하지 않으며, 또한 잔류응력의 효과가 고려되어 있다. 따라서 본 방법에서는 압입 후 신속히 굽힘강도 시험을 실시하여 파괴인성값을 산출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Al₂O₃-30%TiC 및 Si₃N₄ 세라믹의 제조에 있어서 소결온도와 밀도의 관계를 Fig. 1에 나타내었다. Al₂O₃-30%TiC는 1680~1740℃의 소결온도에서 96~97%의 소결밀도를 나타내었으나 그 이상의 소결온도에서도 1차 소결로 치밀화가 어려우므로, 2차 HIP처리하여 치밀화된

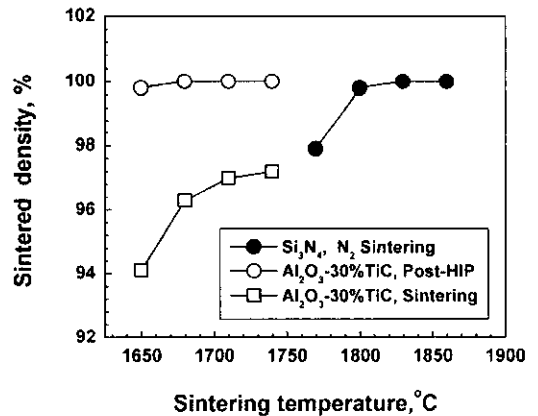


Fig. 1 Variation of sintered density with sintering temperature Al₂O₃-30% TiC and Si₃N₄ ceramics.

소결체를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 통상 Al_2O_3 계 세라믹에서는 1차 소결밀도가 95% 이상인 경우에는 HIP처리에 의해 잔류공을 완전히 제거할 수 있는데, 본 결과에서도 Al_2O_3 -30%TiC의 경우 HIP처리에 의해 이론밀도의 100%에 달하는 치밀한 소결체를 얻을 수 있음을 나타낸다. 한편 Si_3N_4 는 질소 가압소결에 의해 1830℃ 이상의 소결온도에서 이론밀도 100%의 치밀화된 소결체를 얻을 수 있었다. Si_3N_4 소결의 경우 Si_3N_4 표면에 존재하는 SiO_2 와 첨가제인 Al_2O_3 , 및 Y_2O_3 등이 반응하여 액상이 형성되어 액상소결에 의해 치밀화가 이루어진다. 이와 같이 본 연구에서 제조된 2종의 세라믹은 소결 또는 HIP처리에 의해 치밀화된 시험편을 얻을 수 있었다. 각 세라믹의 소결온도는 Si_3N_4 세라믹이 Al_2O_3 -30%TiC에 비해 100℃이상 높은 소결온도가 필요하지만 질소 가압소결에 의해 1차 소결만으로 치밀화된 소결체를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 2에 각 소결체의 조직사진을 나타내었다. Al_2O_3 -30%TiC 세라믹은 Al_2O_3 기지에 강화상인 TiC 입자가 균일하게 분포되어 소결시 Al_2O_3 입자의 성장을 억제시켜 미세한 조직을 가지며 Al_2O_3 세라믹에 비해 인성도 크게 향상된다. 현재 널리 사용되고 있는 절삭공구용 세라믹은 Al_2O_3 에 20~40wt%의 TiC를 첨가하므로 본 조직사진과 유사한 조직을 가지며, 특히 조직사진에서와 같이 본 연구에서 제조된 Al_2O_3 -30%TiC 세라믹도 미세한 TiC가 Al_2O_3 기지에 균일하게 분포함으로써 경질입자의 분산강화 효과에 의해 Al_2O_3 의 기계적 특성을 크게 향상시킬 것으로 예측된다. Al_2O_3 -30%TiC 세라믹은 이러한 특성으로 다른 세라믹 재료에 비해 경도 및 인성의 균형적 특성이 비교적 우수하여 주철 및 고경도강의 절삭공구로 널리 사용되고 있는 세라믹 재료라 할 수 있다. 또한 Si_3N_4 세라믹은 사진에서와 같이 초기원료인 α 상이 소결중 변태하여 생성된 불규칙한 형상의 β 상이 서로 엇갈리게 맞물린 조직을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 조직으로 인하여 Si_3N_4 는 우수한 인성을 가지므로, 현재까지 공업화된 절삭공구용 세라믹 재료중 인성이 가장 우수한 재료로 평가된다. 따라서 Si_3N_4 세라믹 절삭공구는 주철의 건식, 습식의 각종 단속가공에서 뛰어난 절삭성능을 나타낸다.

Table 2에 각 소결온도에 따른 각 세라믹 소결체의 평균입경을 나타내었다. 소결체의 평균 입경은 Al_2O_3 -30%TiC가 Si_3N_4 에 비해 약간 미세하였으나 양쪽 모두 소결온도의 상승에 따라 결정립은 다소 성장한 것을 알 수 있다. 또한 소결온도의 상승에 따라서는 Si_3N_4 계의 입

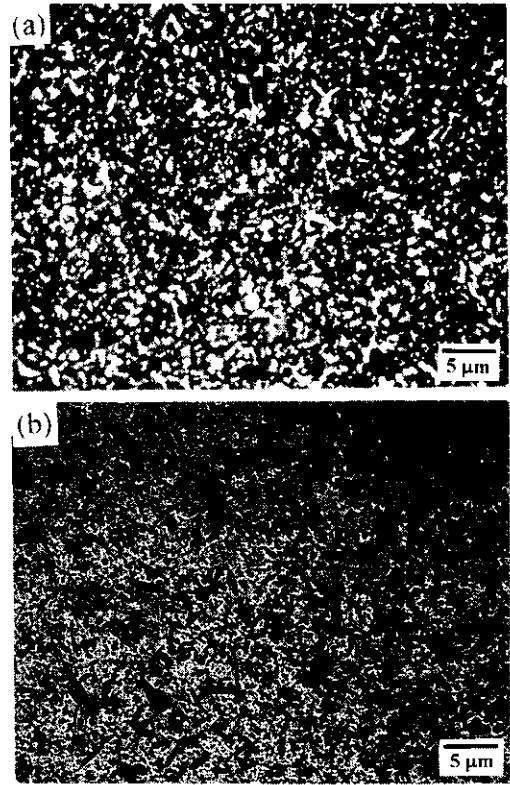


Fig. 2 Optical and SEM micrographs of (a) Al_2O_3 -30% TiC and (b) Si_3N_4 ceramics.

성장이 Al_2O_3 -30%TiC에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. Al_2O_3 세라믹의 경우 적정 소결온도 이상에서는 소결온도의 상승함에 따라 결정립이 크게 성장하지만 Al_2O_3 -30%TiC의 경우 균일하게 분산된 TiC 입자에 의해 입성장의 억제효과가 크기 때문에 미세한 조직을 갖는다.

Table 2 Grain size and density of sintered ceramics

Tool materials	Sintering temp. (°C)	Average grain size (μm)	Density(g/cm ³)
Al_2O_3 -30%TiC (Post-HIPed)	1682	0.94	100
	1710	1.17	100
	1740	1.38	100
Si_3N_4	1800	1.09	99.8
	1830	1.22	100
	1860	1.58	100

Fig. 3에 2종 세라믹의 평균입경과 이에 따른 파괴인성값(IF법)의 변화를 나타내었다. 각 소결체의 평균입경이 커질수록 파괴인성값은 증가하는 경향을 나타내었고, 그 증가 폭은 Si_3N_4 가 상대적으로 크게 나타났다. 일반적으로 경질 세라믹의 미세구조와 인성과의 관계에 있어서 평균입경이 클수록 파괴인성값은 증가하는 경향을 나타내는데, Al_2O_3 및 Y_2O_3 가 미량 첨가된 평균입경 $1\mu\text{m}$ 이하의 미립조직을 갖는 Si_3N_4 의 경우에 파괴인성값은 결정립 직경(d)의 $d^{1/2}$ 에 일정한 기울기로 거의 직선적으로 비례한다고 보고되어 있다.⁽¹¹⁾ 본 결과에서는 각 세라믹의 결정립 성장에 따른 파괴인성값은 증가하였으나 그 증가폭은 결정립 $1\mu\text{m}$ 이하의 세라믹 재료에 비해서는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 Si_3N_4 는 Al_2O_3 -30%TiC에 비해 상대적으로 높은 파괴인성값을 나타내는데, 이것은 Fig. 2의 조직사진에서와 조직중에 존재하는 조대한 봉상입자에 의해 균열의 전파가 편향되거나 또 균열 후면부에서 균열이 더 이상 전파되는 것을 방해하는 균열 가교(bridging)로서 작용하기 때문으로 볼 수 있다.⁽¹²⁾

Table 3에 각 세라믹의 평균입경에 따른 탄성계수 및 파괴인성값을 IF법 및 IS법에 의해 구한 결과를 비교하였다. 각 세라믹의 탄성계수는 Al_2O_3 -30%TiC의 경우 약 418GPa, Si_3N_4 는 302GPa로 나타났으며 평균입경의 증가에 따라 탄성계수는 다소 증가하는 경향을 보였으나 큰 차이는 나타나지 않음을 알 수 있다. 특히 Al_2O_3 -30%TiC의 경우에는 Al_2O_3 소결체에 비교하여 TiC 첨가에 의해 탄성계수는 증가한 것으로 보인다. 세라믹의 높은 탄성계수는 구조용 재료의 응용에는 큰 잇점을 가지며 강도설계에 중요한 물성으로 평가되는데, 탄성계수는 세라믹 소결체의 밀도에 크게 의존하여 기공율이 높을수록 급격히 떨어진다. 그러나 본 시험에서 제조한 각 세라믹은 치밀화된 소결체이므로 밀도저하에 따른 탄성계수의 편차는 없으리라 판단된다. 각 평균입경에 따른 파괴인성값은 전체적으로 IF법에 의한 값이 IS법에 비해 다소 낮은 값을 나타내고 있으나 모두 ± 0.5 의 범위에 있었다. 따라서 각 방법에 의한 파괴인성값의 산출 및 상대비교에는 큰 문제점이 없는 것으로 판단된다. IS법에 의한 파괴인성값(K_{IC})의 측정은 압입 후 굽힘 시험방식이므로 잔류응력의 효과가 고려되어 있고 직접 크랙의 길이를 측정하지 않으므로 측정 조건에 의한 파괴인성값의 편차를 줄일 수 있는 방법이라 할 수 있다. 본 시험결과에서는 IS법에 의해 산출한 파괴인성값은 IF법에 의한 값과 비교해 큰 편차가 없는 것으로 나타났다. 한편 IF법에 의한 파괴인성값의 측정은 압자

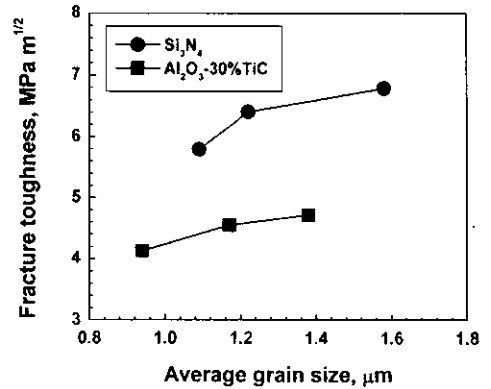


Fig. 3 Variation of fracture toughness with average grain size for Al_2O_3 -30% TiC and Si_3N_4 ceramics.

압입한 크랙의 길이와 압흔의 크기를 이용하는 것으로⁽⁷⁾ 시험편의 크기에 관계없고 시험법이 비교적 간단한 특징을 가지며, 재료의 미세구조 스케일이 압입에 의한 크랙길이에 비해 작은 경우인 불균일계에 대해서도 유효하게 적용 가능한 장점을 가진다. 반면에 크랙길이에 비해 상대적으로 조대입자 조직을 가진 재료에서 편차등의 문제점이 있어 적용이 어렵고 또한 시험편 표면의 잔류응력의 차이가 없어야 한다. 그러나 본 시험의 2종 세라믹은 동일조건으로 표면 연마하였으며 또한 조대 결정립이 아니므로 본 방법의 적용에는 큰 문제점이 없다고 할 수 있다. 따라서 본 시험결과로부터 각 방법에 의해 산출된 파괴인성값의 상호 비교로부터 각 방법에 의한 인성의 검토는 유효하다고 판단된다.

Fig. 4에 각 세라믹의 파괴인성값과 경도와의 관계를 나타내었다. 파괴인성값과 경도는 각 세라믹 모두 직선적인 경향으로 반비례하는 관계를 나타내는데, 절삭공구와 같

Table 3 Fracture toughness values for each material and test method evaluated

Tool materials	Average grain size (μm)	Young's modulus(GPa)	Fracture toughness (MPa · m ^{1/2})	
			IF method	IS method
Al_2O_3 -30%TiC	0.94	418	3.90	4.13
	1.17	422	4.32	4.55
	1.38	421	4.47	4.72
Si_3N_4	1.09	302	5.60	5.79
	1.22	303	5.91	6.11
	1.58	308	6.58	6.79

은 경질재료에 있어서는 특히 이러한 인성과 경도의 균형이 요구된다. 또한 여기서 동일한 조성의 세라믹에 있어서도 결정립과 같은 소결조직의 차이로 인해 경도와 인성이 변화하며, 특히 경도와 파괴인성의 기술가로 부터 파괴인성의 변화에 대한 경도의 변화폭은 Al_2O_3 -30%TiC가 Si_3N_4 에 비해 큰 것을 알 수 있다. 따라서 절삭공구용 세라믹의 중요한 기계적 특성인 경도와 인성의 상관관계와 소결조직과의 관계를 파악하므로써 요구되는 특성에 따른 세라믹의 조직제어가 가능하다고 볼 수 있다. 또한 Fig. 4와 같이 구조용 세라믹의 비커스 경도값과 파괴인성의 비 HV/K_{IC} 는 재료의 취성지표로 평가되고 있다.¹⁷⁾ 즉 HV/K_{IC} 의 비는 변형에 대한 저항값인 경도와 균열을 일으키는 파괴에 대한 저항성인 파괴인성의 비를 구하는 것에 의해 재료의 취성파괴의 정도를 평가할 수 있기 때문이며, 여기서는 Si_3N_4 가 인성이 우수한 세라믹임을 알 수 있다. 또 경질 세라믹에서의 경도값은 탄성계수와 거의 직선적으로 비례하며, $20HV \approx E$ 가 성립한다고 보고되어 있는데, 본 시험에 사용한 2종의 세라믹도 일치하는 경향을 나타내었다. 한편 Al_2O_3 -30%TiC은 $HV1800$ 이상의 높은 경도를 나타내고 있는데, 이러한 특성을 이용하여 특히 내마모성이 크게 요구되는 주철이나 고경도강의 절삭공구로 사용이 기대된다. 그러나 반면에 Si_3N_4 에 비해 인성이 떨어져 중-황삭가공에는 제한을 받게 됨을 알 수 있다. Si_3N_4 의 경도는 약 $HV1500 \sim 1650$ 로 Al_2O_3 -30%TiC에 비하여 떨어지지만 Fig. 3에서와 같이 파괴인성값이 $5.5 \sim 7MPa \cdot m^{1/2}$ 로 상대적으로 우수한 인성을 나타내는 것을 알 수 있다. 일반적으로 Si_3N_4 계 절삭공구는 이러한

특성을 이용하여 주철의 선삭가공 뿐만 아니라 특히 인성이 요구되는 밀링가공과 습식가공에도 사용되는데, 본 Si_3N_4 도 이러한 분야에서의 우수한 절삭특성이 기대된다.

Fig. 5에 각 세라믹의 파괴인성값과 굽힘강도와와의 관계를 나타내었다. Al_2O_3 -30%TiC 및 Si_3N_4 는 파괴인성의 증가 함께 강도도 증가는 경향을 나타내었는데, 그 경향은 일정하지 않았다. 따라서 본 연구에서 각 세라믹의 평균입경이 커짐에 따라 파괴인성은 증가하였으며 또한 파괴인성이 증가함에 따라 세라믹의 강도도 다소 증가하는 경향을 나타내었으나 그 경향은 뚜렷하지 않았다. 각종 구조용 세라믹에서도 파괴인성의 증가와 함께 강도도 증가하며 복합 세라믹은 그 조성에 따라 그 경향이 다소 차이가 있는 것으로 보고되어 있다.¹³⁾ 그러나 세라믹이나 초경합금과 같은 경질의 취성재료의 강도는 조직중의 다른 결함의 크기나 결함의 위치나 크기에 따라 좌우되는 경우도 많기 때문에 다른 조직적인 인자가 동일하고 결정립의 차이만 의해서 강도가 변화한다고 볼 수는 없다고 판단된다. 본 결과에서 파괴인성의 증가에 따라 강도의 증가가 일정하지 않은 것도 이러한 영향이라 사료된다. 또한 세라믹의 강도는 경도 및 인성에 비해 소결밀도에 크게 의존하는데 소결밀도에 따른 굽힘강도의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 소결밀도가 떨어짐에 따라 강도는 크게 저하하는데 그 저하폭은 Al_2O_3 -30%TiC가 Si_3N_4 에 비해 큰 것으로 나타났다. 절삭공구용 세라믹의 소결밀도는 통상 약 99.5% 이상의 치밀화가 요구되는데, 치밀화되지 않은 낮은 밀도의 소결조직중에 존재하는 기공은 용력부가서 파괴의 기점으로 작용하므로 세라믹의 강도를 크게 저하시키며 특히 단

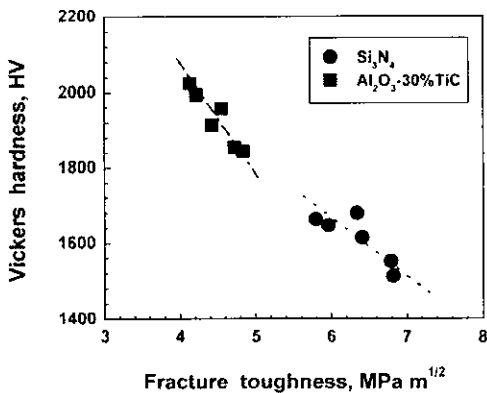


Fig. 4 Relationship between hardness and fracture toughness for Al_2O_3 -30% TiC and Si_3N_4 ceramics.

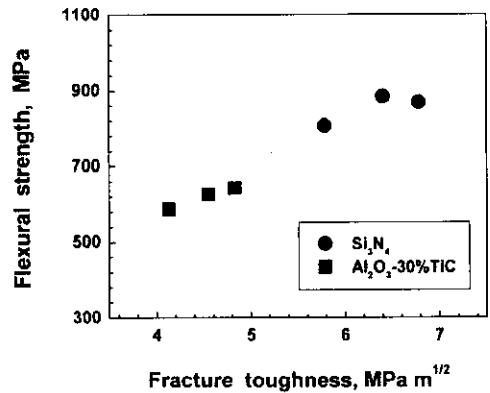


Fig. 5 Relationship between flexural strength and fracture toughness for Al_2O_3 -30% TiC and Si_3N_4 ceramics.

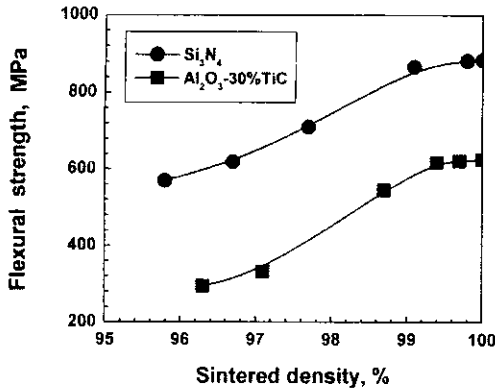


Fig. 6 Relationship between sintered density and flexural strength for Al₂O₃-30% TiC and Si₃N₄ ceramics.

속 절삭가공중에 결손의 원인이 될 수 있다. 또한 동일한 기공률에서도 이러한 기공의 크기 및 위치에 따라서 강도는 크게 달라질수도 있으므로, 강도의 편차가 적은 균일한 기계적 특성을 갖는 절삭공구용 세라믹의 제조를 위해서는 치밀화된 소결조직을 갖는 세라믹의 제조가 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 대표적인 절삭공구용 세라믹인 Al₂O₃-30%TiC 및 Si₃N₄계 세라믹을 제조하여 각 세라믹의 소결조건에 따른 인성과 경도 및 강도의 상관관계를 소결조직과 관련하여 비교 고찰하였다. 또한 절삭공구용 세라믹에 있어서 소결조직의 변화가 각 기계적 특성에 미치는 영향을 파악함으로써 세라믹 절삭공구의 내마모성과 인성등을 예측할 수 있음을 제시하였다. 본 연구에서 각 실험을 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 각 세라믹의 평균입경은 소결온도에 따라 변화하였으며 소결체는 평균입경 1~2 μ m의 소결조직을 나타내었다. 소결온도가 높아짐에 따라 소결체의 평균입경이 증가하였고 이에 따라 파괴인성값은 증가하였으나 경도값의 낮아졌는데, 경도값의 감소경향은 Al₂O₃-30%TiC가 Si₃N₄에 비해 크게 나타났다.
- (2) Al₂O₃-30%TiC의 파괴인성값은 소결체의 평균입경에 따라 4~5MPa · m^{1/2}, Si₃N₄ 세라믹은 5.5~7MPa · m^{1/2}의 값을 나타내었는데, IF법 및 IS법에 의

한 파괴인성의 평가에서 두 방법에 따른 편차는±0.5의 범위내로 나타났다.

- (3) 파괴인성값의 증가에 따라 경도값은 크게 떨어진 반면 굽힘강도는 다소 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히 Al₂O₃-30%TiC의 굽힘강도는 Si₃N₄에 비해 소결밀도가 저하함에 따라 크게 떨어졌다.

참고 문헌

- (1) J. Gray baldoni and S. T. Buljan, "Ceramics for Machining", Ceramic Bulletin, Vol.67, No.2, pp. 381~387, 1988.
- (2) S. Smith and J. Tlusty, "Current Trends in High-Speed Machining", Transactions of the ASME, Vol.119, No.11, pp. 664~666, 1997.
- (3) 狩野 勝吉, "21世紀の切削加工技術 5 切削加工のキーテクノロジー「工具材料」", 機械技術, Vol.45, No.6, pp. 96~103, 1997.
- (4) M. Lee and M. P. Borom, "Rapid Rate Sintering of Al₂O₃-TiC Composite for cutting-Tool Application", Vol.3, No.1, pp. 38~44, 1998.
- (5) K. W. Chae and D. Y. Kim, "Effect of Y₂O₃ Additions on the Densification of Al₂O₃-TiC Composite", Adv. Ceram. Mater., J. Am. Ceram. Soc., Vol.76, No.7, pp. 1857~1860, 1993.
- (6) N. Hirotsaki and Y. Akimune, "Effect of Grain Growth of β -Silicon Nitride on strength, Weibull Modulus, and Fracture Toughness", J. Am. Ceram. Soc., Vol.76, No.7, pp. 1892~1894, 1993.
- (7) 西田侯彦, 安田榮一, "セラミックスの力学的特性評價", 日刊工業新聞社, pp. 68~95, 1986.
- (8) 實吉純一, 菊池吉充, 能本乙珍編 : 超音波技術便覽新訂版, 日刊工業新聞社, pp. 1324~1326, 1978.
- (9) R. H. Marion, "Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials", S. W. Freiman, ed., ASTM STP 678, ASTM, Philadelphia, pp. 103~109, 1979.
- (10) K. Niihara, R. Morena and D. P. H. Hasselman, J. Mater. Sic. Letter, Vol.1, pp. 13~17, 1982.
- (11) H. J. Kleebe, G. Pezzotti and G. Ziegler, "Microstructure and Fracture Toughness of Si₃N₄ Ceramics: Combined Roles of Grain Morphology and Secondary Phase Chemistry", J. Am. Ceram.

Soc., Vol.82, No.7, pp. 1857~1867, 1999.

- (12) N. Ramachandran and D. K. Shetty, "Rising Crack-Growth- Resistance (R-Curve)Behavior of Toughened Alumina and silicon Nitride Ceramics", J. Am. Ceram. Soc., Vol.74, No.10, pp. 2634~2641, 1991.
- (13) R. G. Munro and S. W. Freiman, "Correlation of Fracture Toughness and Strength", J. Am. Ceram. Soc., Vol.82, No.8, pp. 2246~2248, 1999.