

SiC계 세라믹 절삭공구의 절삭특성 평가 Part 2 : SiC계 세라믹 절삭공구의 수명곡선과 절삭력 특성

박준석*, 김경재*, 권원태**, 김영욱***

Cutting Characteristics of SiC-based Ceramic Cutting Tools Part 2 : Tool Life and Cutting Force Characteristics of SiC-based Ceramic Cutting Tools

June Suck Park*, Kyung Jae Kim*, Won Tae Kwon** and Young -Wook Kim***

ABSTRACT

Ceramic tool has to equip with not only high toughness and strength but also low thermal expansion and good thermal conductivity which leads to the high thermal shock resistance. These characteristics make it have longer tool life under thermal stress condition. In this study, commercial Si_3N_4 ceramic cutting tool and home-made SiC based ceramic cutting tools which have different sintering time and chemical composition are tested under various cutting conditions. The experimental results are compared in terms of tool life and cutting force. Generally, as the cutting speed and the feed rate increase, the cutting force and the flank wear growth ratio increase, too. The performance of home-made SiC based ceramic cutting tool shows the possibility to be a new ceramic tool.

Key Words : Si_3N_4 ceramic tool(Si_3N_4 세라믹 공구), SiC-based ceramic tool(SiC계 세라믹 공구), Tool life curvature(공구 수명 곡선), Flank wear(플랭크 마멸), Cutting force(절삭력)

1. 서론

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 열팽창율이 높으며 영률(Young's Modulus)이 높기 때문이다. 즉 낮은 열전

도성으로 인하여 열 집중이 발생하고 이는 인접한 지역과 높은 온도 차이(thermal gradient)로 나타난다. 세라믹은 열팽창율이 높기 때문에 인접한 지역끼리의 높은 온도차이는 높은 열팽창율의 차이로 나타나고 결국 심한 열응력이 발생한다. 이 열응력의 크기는 절삭시 발생하는 인장력의 크기보다 커서 공구가 파괴되는 원인이 되거나⁽¹⁾, 열에 의한 마멸 발생으로 나타난다.⁽²⁾ 열응력에 의한 파손과 마멸을 줄이기 위하여 열 팽창률이 적고

2001년 1월 9일 접수

* 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원

** 서울시립대학교 기계정보공학과

*** 서울시립대학교 재료공학과

열 전도율이 좋은 Si₃N₄를 모재로 공구를 만들거나⁽³⁾, Al₂O₃공구에 열팽창률이 적고 열전도율이 적은 SiC를 섞는 방법이 제시되었다.⁽⁴⁾

이 논문에서는 SiC를 모재로 하는 절삭공구특성에 대하여 연구하였다. SiC는 인성과 경도가 다른 세라믹공구에 비해 작기 때문에 미세구조를 바꾸거나 Si₃N₄, TiC등을 혼합하여 인성과 경도를 증가시켰다. 기존 공구로는 고속가공과 경도가 높은 공작물의 가공에 적절한 성능을 보이는 Si₃N₄를 택하여 열처리된 SCM440구조강의 절삭하면서 특성을 파악하였고 이 절삭조건을 기준으로 현재 개발 중인 SiC계 세라믹 공구의 절삭 성능과 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

절삭특성 비교시험에 사용된 공구는 상용제품인 Si₃N₄공구와 (AS10 :Taegu Tec) 이밖에 새로 개발 중인 SC1, ST3, SCN1, SCN2, SCN4, SCN8 등이다.(Table 1) SC1은 순수 SiC로만 이루어져 있고, ST3은 SiC-TiC 조성이며 SCN1, SCN2, SCN4, SCN8은 같은 SiC-Si₃N₄조성으로 이루어져 있으나 소결시간이 서로 다르다.⁽⁵⁾

절삭가공 시험에 사용한 공작기계는 선반이며, 각 절삭공구의 규격은 SNGN 120416이다. 홀더(holder)는 Taegu Tec사의 CSDNN 2525M 12CEA를 사용하였고, 이때 절입각은 45° 였다. 기준절삭조건을 선정하기 위하여 절삭깊이 d=0.25mm, 절삭속도 v=55, 85, 100, 140, 160m/min, 이송량 f=0.2, 0.3, 0.4, 0.5mm/rev로 Si₃N₄공구를 이용하여 열처리한 SCM440 (AISI4140)을 절삭하였다. Instron사 Rockwell Series 600 경도시험기를 사용하여 측정한 결과 열처리한 SCM440의 경도는 HRC 58으로 측정되었고 열처리 깊이를 고려하여 3mm 깊이를 절삭후 다시 열처리 하여 사용하였다. 각각의 마멸특성을 비교한 후, 가장 우수한 마멸특성을 보인 조건에서, SC1, ST3, SCN1, SCN2, SCN4, SCN8 세라믹 공구를 이용하여 절삭 실험하였다. 건식 절삭으로 하여 각 공구간의 피삭체에 따른 마멸특성을 비교하였다. 또한, 자동차 브레이크에 많이 사용하는 회주철(Gray cast iron, FC 25)을 Si₃N₄의 추천 절삭조건 (절삭속도 200~500m/min, 이송량 0.3~0.8mm/rev) 중 하나인 절삭속도 v=330m/min, 이송량 f=0.3mm/rev의 조건에서

도 절삭시험을 행하였다. 각 절삭조건에서 공구의 손상은 절삭한 공구의 여유면 평균 마멸량으로 평가하였으며, 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.

3. 실험결과 및 고찰

Table 2는 Si₃N₄로 열처리된 SCM440을 절삭할 때 절삭조건을 나타낸다. 절삭속도가 210m/min.일 때 채터가 발생하기 때문에 최고 절삭속도를 160m/min로 제한하였다.

실험결과 Fig. 1에서 4까지 볼 수 있듯이 55~160m/min의 절삭속도 범위에서 절삭속도가 증가

Table 1 Composition of SiC-based Ceramics

Sample	Composition (wt.%)						Sintering time
	SiC	Si ₃ N ₄	G*	TiC	Al ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	
SC1	90				4.5	5.7	1 h
ST3	60			30	4.5	5.7	1 h
SCN1	20	72	8				1 h
SCN2	20	72	8				2 h
SCN4	20	72	8				4 h
SCN8	20	72	8				8 h

*G: Y_{0.124}Mg_{0.160}Si_{0.414}Al_{0.302}O_{1.4}N_{0.151}

Table 2 Cutting conditions for Si₃N₄ insert during machining heat treated SCM440 (depth of cut is fixed at 0.25mm)

		이송량 (mm/rev.)			
		0.2	0.3	0.4	0.5
절 삭 속 도 (m/ min.)	55	o	o	o	o
	85	o	o	o	o
	100	o	o	o	o
	140	o	o	o	o
	160	o	o	o	o
	210	x	x	x	x

o: no chatter occurred, x:chatter occurred

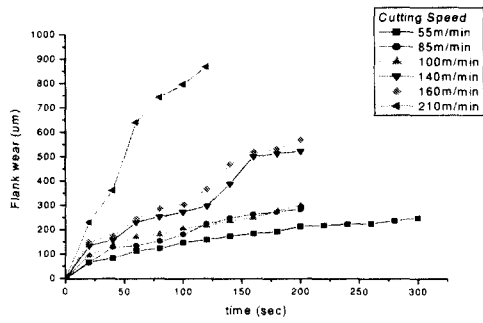


Fig. 1 Flank wear curve of Si_3N_4 insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut

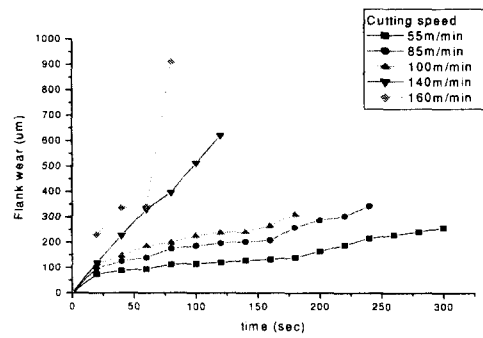


Fig. 3 Flank wear curve of Si_3N_4 insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with 0.4mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut

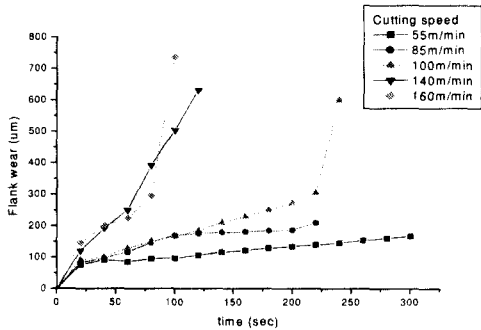


Fig. 2 Flank wear curve of Si_3N_4 insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with 0.3mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut

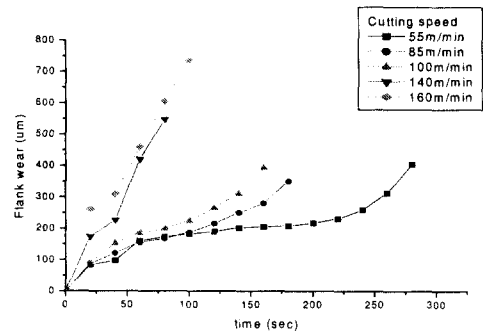


Fig. 4 Flank wear curve of Si_3N_4 insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with 0.5mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut

하면 마멸도 빠르게 진행하였다. 이송량 증가시에도 마멸량이 증가하지만, 이송량이 0.3mm/rev일 때, 다른 이송량에 비교해 우수한 마멸특성을 보였다. 마멸량 300µ m에 도달 할 때까지를 기준으로 각 절삭조건에서의 절삭길이가 Fig. 5에 주어졌다. 여기서 Si_3N_4 인서트는 절삭속도 $v=55\text{m/min}$, 이송량 $f=0.3\text{mm/rev}$ 의 조건에서 531.7m의 가공길이를 갖는 가장 우수한 마멸특성을 보였다. 하지만, 실제 생산현장에서는 주어진 공구로 절삭할 수 있는 가공길이를 최대화하는 것보다 주어진 시간에 가장 많은 거리를 절삭하는 생산성이 중요하다. 그러므로 생산성을 나타내는 시간 당 절삭거리가 더욱 중요하다. 공구교환시간은 작업자에 따

라 달라지나 보통의 작업자가 공구를 교환하고 다시 선반을 작동시키는 시간을 20초로 잡았을 때 시간 당 절삭거리는 다음 식으로 계산된다.

$$1hr = nt_w + (n-1)t_c$$

$$n = \frac{3620}{(t_w + 20)} \quad (1)$$

$$d_{\max} = nt_w * Cs$$

여기서, n = 시간당 사용된 insert 수, t_w =각 insert의 마멸량 300µm할 때까지의 시간, t_c =공구

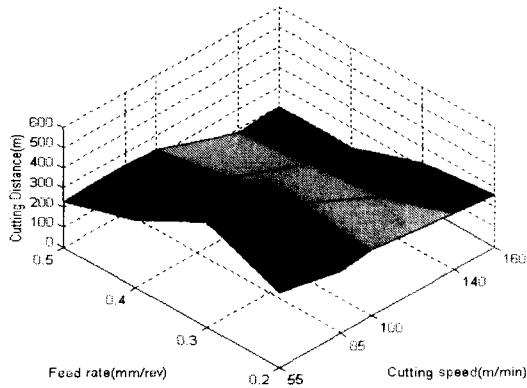


Fig. 5 Cutting distance of Si_3N_4 insert until flank wear reaches $300\mu\text{m}$ under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (depth of cut: 0.25mm)

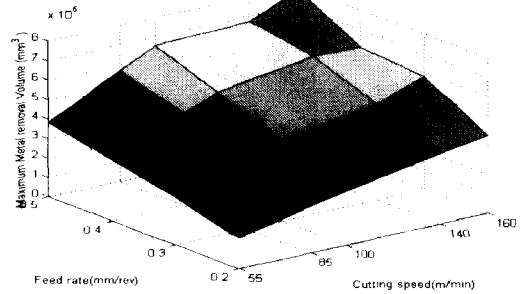


Fig. 7 Maximum cutting volume per hour of Si_3N_4 insert considering insert changing time under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (depth of cut: 0.25mm)

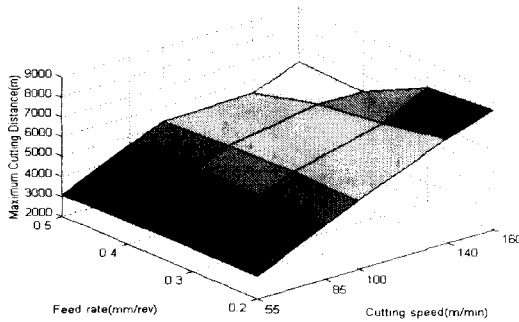


Fig. 6 Maximum cutting distance per hour of Si_3N_4 insert considering insert changing time under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (depth of cut: 0.25mm)

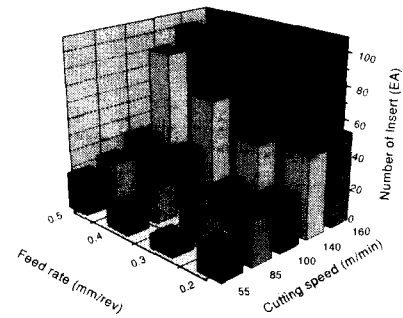


Fig. 8 Number of insert used in an hour under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (depth of cut: 0.25mm)

교환시간, d_{max} = 시간당 최대 절삭거리 그리고 C_s 는 절삭속도이다. 식 (1)의 첫 번째 식과 두 번째 식은 절삭공구의 수명과 교환시간을 고려할 때 1 시간의 절삭시간동안 사용되는 절삭공구의 개수를 계산한 것이고 세 번째 식은 그 동안의 절삭거리를 계산한 것이다. 이 절삭거리가 Fig. 6에 주어졌다. 결과적으로 절삭속도 $v=160\text{m/min}$, 이송량 $f=0.2\text{mm/rev}$ 의 조건일 때 시간당 최대 절삭거리가 8017.7m로 가장 길었다. 실제로 절삭한 부피는 Fig. 7에서 알 수 있듯이 절삭속도 $v=160\text{m/min}$, 이송량 $f=0.5\text{mm/rev}$ 일 때 최대가 된다. 하지만 세라믹 공구가 마무리 절삭에 사용되는 것을 고려

할 때 이송량이 적은 것이 표면 조도가 좋아지므로 절삭속도 $v=160\text{m/min}$, 이송량 $f=0.2\text{mm/rev}$ 의 조건으로 실험을 수행하였다. Fig. 8은 단위 시간당 사용된 공구의 개수를 나타낸다. 결과적으로 절삭속도 $v=160\text{m/min}$, 절삭깊이 $d=0.25\text{mm}$, 이송량 $f=0.2\text{mm/rev}$ 의 조건에서 Si_3N_4 세라믹 공구로 SCM440을 절삭할 때 최대생산성을 나타내므로, 이 조건에서 현재 개발중인 SiC계 공구를 실험하였으며 그 결과 얻어진 공구수명곡선이 Fig. 9에 주어졌다. SC1(SiC)과 ST3(SiC-TiC)는 절삭개시 직

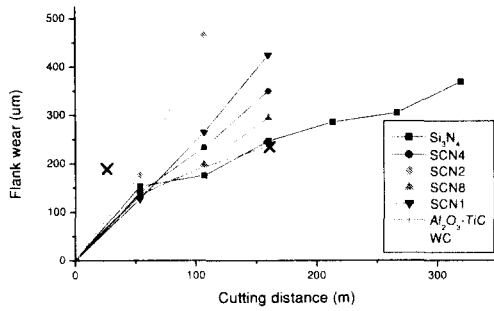


Fig. 9 Flank wear curve of various inserts during machining heat treated SCM440 (cutting speed : 160m/min, feedrate: 0.2mm/rev., depth of cut: 0.25mm)

후 파손되었고, 상대적으로 소결시간이 짧은 SCN1과 SCN2는 초기부터 급격히 마멸이 진행되어 정상적인 절삭가공이 어려운 것을 알 수 있으며, 상대적으로 소결시간이 긴 SCN4, SCN8은 초기에 Si₃N₄와 유사한 내마멸성을 나타내지만, 80m 이후로 SCN8 보다 소결 시간이 짧은 SCN4가 급격히 마멸이 된다. SC1(SiC)과 ST3(SiC-TiC)가 절삭개시 직후에 파손된 것은 낮은 강도에 기인하며 비교적 높은 강도를 가진 SCN 공구 중에서 경도와 파괴인성이 높은 SCN8의 수명이 긴 것으로 나타났다.⁽⁵⁾ 현재까지의 결과에 의하면 소결시간이 길수록 공구수명이 긴 것으로 나타났다. 같은 절삭조건 하에 코팅 초경공구(TT2500, Taegu Tec.)와 상용 Al₂O₃-TiC 공구(AB30, Taegu Tec.)를 사용한 결과도 보여졌다. 그림에서 알 수 있듯이 초경공구 절삭 개시 후 곧 파괴되었고 Al₂O₃-TiC공구는 Si₃N₄와 유사한 마멸 특성을 보이다가 급작스럽게 파괴되었다. 이는 열전도율이 낮은 Al₂O₃공구가, 경도가 높은 공작물을 절삭할 때 발생하는 높은 열에 의한 열충격을 견디지 못해서 생기는 현상으로 추정된다. Fig. 10과 11은 가공후 여유면에서 본 Si₃N₄와 SCN8 의 마멸형태이다. 끝부분이 마멸에 의하여 없어졌고 마찰에 의한 마멸선들이 뚜렷하게 보임을 알 수 있다. Fig. 12부터 Fig. 14까지는 절삭속도 v=160m/min, 절삭깊이 d=0.25mm, 이송량 f=0.2mm/rev의 조건에서 절삭할 때, 절삭력의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 공통적으로 배분력이 가장 크게 나타남을 알 수 있는



Fig. 10 Photograph of Si₃N₄ insert when flank wear land length reaches 0.3mm during machining of heat treated SCM440 (cutting speed: 160m/min, feedrate: 0.2mm/rev., depth of cut: 0.25mm)



Fig. 11 Photograph of SCN8 insert when flank wear land length reaches 0.3mm during machining of heat treated SCM440 (cutting speed: 160m/min, feedrate: 0.2mm/rev., depth of cut: 0.25mm)

데 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 최소화 할 수 있다. 또한 SiC기반 공구들의 절삭력이 이송력의 경우 Si₃N₄공구의 이송력과 유사하지만, 배분력과 접선방향 절삭력은 Si₃N₄공구의 경우보다 상당히 작다. 이는 공구와 공작물 간의 마찰력의 차이에 기인한 것으로 추정된다.

Fig. 15은 열처리한 SCM 440보다 경도가 낮은 회주철(Gray cast iron, 경도 180~250HB)을 피삭재로 한 절삭속도 330m/min, 절삭깊이 0.25mm, 이송

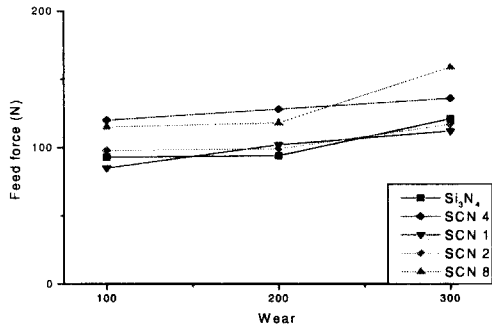


Fig. 12 Feed force variations during machining heat treated SCM440 (Cutting speed : 160m/min, feed rate : 0.2mm/rev., depth of cut: 0.25mm)

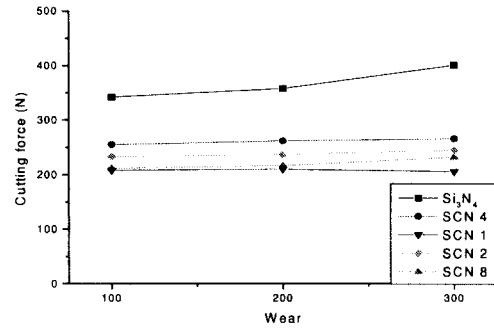


Fig. 14 Tangential force variations during machining heat treated SCM440 (Cutting speed : 160m/min, feed rate; 0.2mm/rev., depth of cut; 0.25mm)

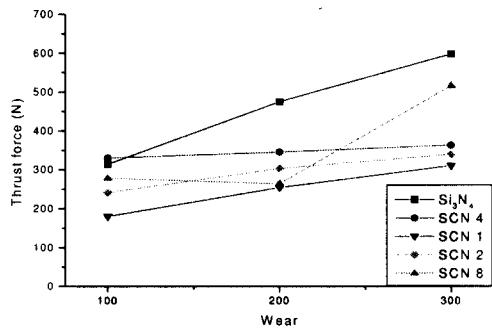


Fig. 13 Thrust force variations during machining heat treated SCM440 (Cutting speed : 160m/min, feed rate: 0.2mm/rev., depth of cut; 0.25mm)

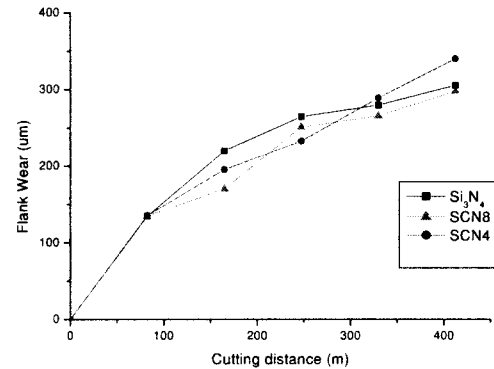


Fig. 15 Flank wear curves of various tools with cutting distance in the machining of Gray cast iron (Cutting speed : 330m/min, feedrate: 0.3mm/rev., depth of cut: 0.25mm)

량 0.3mm/rev의 조건에서 절삭실험을 한 결과이다. SCN8보다 소결시간이 짧은 SCN4는 130m 이후 급속한 마멸을 보이지만, 소결시간이 더 긴 SCN8은 오히려 Si₃N₄보다 약간 더 마멸량이 적은 것을 볼 수 있다. 위 실험을 바탕으로 소결시간이 더 늘어남에 따른 기계적 특성과 공구수명의 변화에 대하여 더 연구가 진행 될 것이며 또한 전체에 대한 SiC 성분의 변화가 공구수명에 미치는 영향도 진행될 예정이다.

4. 결론

Si₃N₄공구와 SiC-Si₃N₄계 세라믹 공구를 열처리

한 SCM 440을 공작물로 하여 절삭특성을 비교, 검토하기 위해, SiC기반 세라믹 공구를 제조하여 기계적 성질을 평가하고, 선삭 가공에 있어서 절삭조건별 각 공구의 절삭특성에 대하여 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 열처리한 SCM 440을 건식절삭할 때, Si₃N₄ 공구의 절삭조건 변화에 따른 공구 수명곡선을 구하였다.
- 2) Si₃N₄공구에서 공구 교환시간을 고려하여, 시간당 최대 절삭거리를 얻었다.

- 3) 절삭력분석결과 세라믹공구의 결정방향이 배분력과 수직인 방향으로 성장하는 것이 유리하다는 것이 밝혀졌다.
- 4) 소결시간이 다른 5가지 SiC-Si₃N₄ 세라믹을 2)에서 구한 절삭조건에 의하여 실험한 결과, 소결시간이 가장 긴 SCN8이 상용 Si₃N₄공구와 근접한 결과를 보였고 소결시간이 짧을수록, 더 빨리 마멸이 발생하였다.

후 기

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

참고문헌

1. Steven F. W. and Sergel-Tomislav Buljan, "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.
2. Hans K. T. and SVEN B., "Wear Mechanism of Ceramic Cutting Tool," Ceram. Bull., Vol. 67, No. 6, pp. 1020-1025, 1988.
3. M. Szafran, E. Boyryk, D. Kukra, A. O. " Si₃N₄-Al₂O₃-TiC-Y₂O₃ Composites Intended for the Edges of Cutting Tools," Ceramics International 26, pp. 579-582, 2000.
4. Elizabeth R.B., Pankaj K.M., Albert F.S., and Craig W.B. "Machining with Al₂O₃-SiC-Whisker Cutting Tools," Ceram. Bull., Vol. 67, No. 6, pp. 1016-1019, 1988.
5. J. S. Park, K. J. Kim, W. H. Shim, W. T. Kwon and Y-W Kim, "Cutting Characteristics of SiC-based Ceramic Cutting Tools Part 1 : Microstructure and Mechanical Properties of SiC-based Ceramic Cutting Tools" Vol. 18, No. 9, pp. 82-88, 2001.