

## SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>계 세라믹 절삭공구의 절삭특성 평가

박준석\*, 김경재\*(서울시립대 대학원 정밀기계공학과), 권원태\*\*(서울시립대 정밀기계공학과),  
김영욱\*\*\*(서울시립대 재료공학과)

### Cutting characteristic of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tools

J. S. Park, K. J. Kim(University of seoul), W. T. Kwon( University of seoul), Y. W. Kim( University of seoul)

#### ABSTRACT

It is known that Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic insert has less hardness than Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic insert. But Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic insert has not only high toughness and strength but also low thermal expansion coefficient, which makes it has longer tool life under thermal stress condition. In this study, commercial Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic insert and home-made SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic insert which has different sintering time and chemical composition is tested under various cutting conditions. The experimental result is compared in terms of tool life and cutting force. Generally, As the cutting speed and the feed rate increased, the cutting force and the flank wear increased too. The performance of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic insert shows the possibility to be a new ceramic tool.

**Key Words** : Mechanical properties(기계적 성질), Chemical properties(화학적 성질), Ceramic tool(세라믹 공구), Carbide tool(초경 공구), Flank wear(플랭크 마모), Cutting force(절삭력)

#### 1. 서론

세라믹공구를 사용하여 공작물을 절삭할 경우 다른 공구와 마찬가지로 파손과 마모가 문제가 된다. 공구의 급작스런 파손방지를 위해서 세라믹공구가 갖추어야 할 성질은 인성과 열 충격 저항이고 마모방지를 위해 갖추어야 할 성질은 경도와 내마모성 그리고 화학적 안정성이다. 세라믹 공구는 높은 내마모성과 고온경도, 화학적 안정성 등의 장점을 갖추고 있어 마모가 잘 발생하지 않는다. 결과적으로 높은 경도를 갖는 공작물을 적은 절삭깊이와 이송량을 주어 고속으로 절삭하는데 많이 사용된다. 세라믹 공구는 초경공구에 비해 인성과 열 충격저항이 떨어진다. 인성증가를 위해 세라믹 공구로 가장 많이 사용되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 다른 성질을 갖는 세라믹들을 섞거나 고용체를 만드는 방법이 소개되었다. 낮은 열팽창계수의 높은 열전도율을 갖는 SiC를 털 모양의 형태로 섞어서 인성을 높인 SiC-whiskered 공구는 Ni 계 합금 Inconel 718을 절삭하는데 가장 많이 사용된다.[1] ZrO<sub>2</sub>를 섞은 공구는 ZrO<sub>2</sub>가 응력을 받으면 결정구조가 정방정계에서 단사정계로 변화하

면서 부피가 팽창하고 결과적으로 압축응력을 형성하여 공구의 파괴저항이 향상된다.[2, 3] TiC는 경도가 크고 열팽창계수가 높다. 일반적으로 높은 열팽창계수를 갖는 물질은 열 충격에 약한 경향을 보이나 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 같이 팽창이 적은 물질에 TiC를 섞음으로써 열을 받을 때 서로 다른 열 팽창률로 응력을 발생시켜 파괴인성을 증가시키는 방법도 개발되었다.[4]

세라믹공구를 초경공구와 비교할 때 갖는 단점 중의 하나가 낮은 열 충격저항이다. 초경공구에 비하여 열전도율과 파괴인성은 낮고 열 팽창률과 영률은 크기 때문에 결과적으로 세라믹공구에서는 절삭력에 의한 파괴보다는 열 충격에 의한 파괴가 더 많이 발생한다.[7] 세라믹 공구에서 발생하는 마모의 종류에는 abrasive wear, diffusion wear, chemical wear, depth of cut wear 등이 있는데, Abrasive wear는 경도와, chemical wear와 diffusion wear는 공구소재의 화학적 안정성과, depth of cut wear는 열 충격량과 각각 관계가 있다. Abrasive wear를 감소시키려면 경도를 증가시켜야 한다. 경도를 증가시키는 방법으로는 결정립의 크기를 조정하는 방법[5], SiC나 TiC를 섞는 방법[1, 6] 등이 있다. 하지만 이런 방법들은 인성

이나 화학적 안정성을 감소시키기 때문에 [1, 5] 그 한계를 명확히 하여야 한다. 화학적 반응에 의한 마모는 주로  $SiC$ 나  $Si_3N_4$ 를 포함하는 세라믹 공구에서 발생하는데 그 이유는  $SiC$ 와  $Si_3N_4$ 가 Fe와 반응하기 때문이다. 열에 의한 마모는 depth of cut wear가 있는데 이것은 절삭하는 공작물의 표면과 공구가 만나는 지점에서 발생한다. 공구에서 절삭에 참여하는 부분과 참여하지 않는 부분의 경계로 커다란 온도 차이에 의해 열 충격 차이를 유도하고 결과적으로 공구는 열 응력을 계속 받게 되어 마모가 발생하게 된다. 이는 세라믹공구가 열 충격에 의하여 파괴가 발생하는 것과 같은 원리이다.

이 논문에서는 지금까지 설명한 ceramic 공구 중, 고속가공과, 경도가 높은 공작물의 가공에 적절한 성능을 보이는  $Si_3N_4$  공구와 이번에 새로 개발한  $SiC-Si_3N_4$ 계 ceramic 공구 (CT-series)의 절삭 성능을 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

절삭특성 비교시험에 사용된 공구는 상용제품인  $Si_3N_4$ 공구와 (AS10 :Taegu Tec) 새로 개발 중인 CT3-1, CT4, CT5-1, CT5-2, CT6, CT7, CT8 등이다. CT3-1은 순수  $SiC$ 로만 이루어져 있고, CT4는  $SiC/TiC$  조성이며 CT5-1, CT5-2, CT6, CT7, CT8은 같은  $SiC-Si_3N_4$ 조성으로 이루어져 있으나 소결시간과 화학적 구성이 서로 다르다. 절삭가공 시험에 사용한 공작기계는 선반이며, 각 절삭공구의 규격은 SNGN 120416이다. 홀더(holder) 규격은 CSDNN 2525M 12CEA를 사용하였고, 이때 절입각은  $45^\circ$ 였다. 기준절삭조건을 선정하기 위하여 절삭깊이  $d=0.25mm$ , 절삭속도  $v = 55, 85, 100, 140, 160m/min$ , 이송량  $f=0.2, 0.3, 0.4, 0.5mm/rev$ 로  $Si_3N_4$ 공구를 이용하여 열처리한 SCM440 (AISI4140)을 절삭하였다. 각각의 마모특성을 비교한 후, 가장 우수한 마모특성을 보인 조건에서, CT3-1, CT4,

Table 1 Mechanical properties of cutting tool materials

Tool materials	Flexural Toughness $MPam^{1/2}$	Hardness $kg/mm^2$	Young's Modulus $Gpa$	Poisson's Ratio	Bulk Density $g/cm^3$
$Si_3N_4$	6.0	1,500	290	0.27	3.2
CT 3-1	5.3	1,935.3	-	-	3.183
CT 4	6.4	1,931.4	-	-	3.58
CT 5-1	4.7	1,563.9	324	0.277	3.175
CT 5-2	4.7	1,563.9	324	0.277	3.175
CT 6	4.5	1,610.9	310	0.292	3.154
CT 7	5.2	1,561.5	330	0.283	3.14
CT 8	4.7	1,590.4	-	-	3.177

CT5-1, CT5-2, CT6, CT7, CT8 세라믹 공구를 이용하여 절삭 실험하였다. 건식절삭으로 하여 각 공구간의 피삭재에 따른 마모특성을 비교하였다. 각 절삭조건에서 공구의 손상은 절삭한 공구의 플랭크면 평균 마모량으로 평가하였으며, 마모량은 공구 현미경을 사용하여 측정하였다. 또한 절삭 시험동안의 절삭력 측정을 위해 Kistler사의 9257B 공구 동력계를 사용하였고, 측정된 절삭력은 HS-DAS 12 보드를 통해 A/D변환한 후 586PC에 저장하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

우선 준비된 시편의 기계적 성질을 측정하여 Table 1에 나타내었다. 이 표에서 알 수 있듯이 준비된 세라믹 시편들은  $Si_3N_4$ 인서트와 비교하여 유사하거나 약간 낮은 파괴 강도, 높은 경도와 영률을 가지고 있음을 알 수 있다. 절삭속도가  $210m/min$  일 때 채터링 현상이 발생하기 때문에 최고 절삭속도를  $160m/min$ 로 제한하였다.

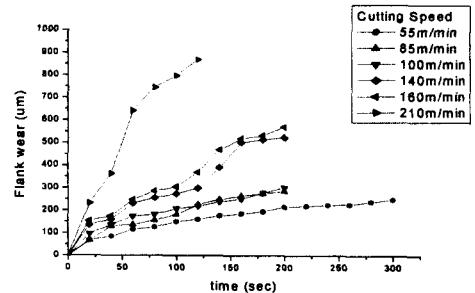


Fig. 1 Flank wear curve of  $Si_3N_4$  insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with  $0.2mm/rev$  feed rate and  $0.25mm$  depth of cut

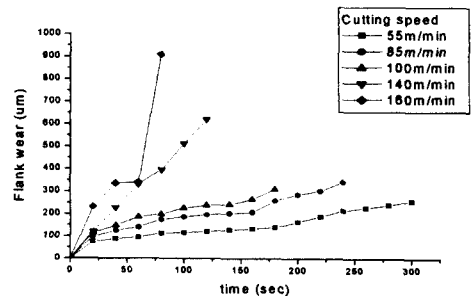


Fig. 2 Flank wear curve of  $Si_3N_4$  insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with  $0.4mm/rev$  feed rate and  $0.25mm$  depth of cut

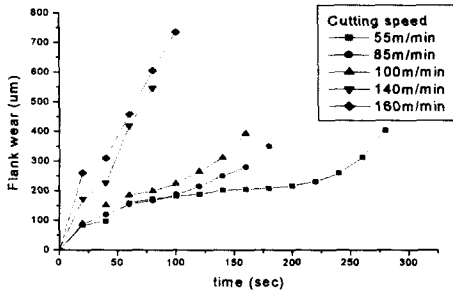


Fig. 3 Flank wear curve of  $Si_3N_4$  insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with 0.5mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut

Fig. 1에서 3가지 볼 수 있듯이 55~160m/min의 절삭속도 범위에서 절삭속도가 증가함에 따라 마모가 빠르게 진행되는 경향을 보였다. 이송량이 증가할 때도 마모량이 증가하였지만, 이송량  $f=0.3\text{mm/rev}$ 에서 다른 이송량에 비해 우수한 마모특성을 보였다. 절삭력의 경우, 이송량이 커짐에 따라 대체적으로 절삭력이 증가하고, 모든 실험에서 공통적으로 배분력이 가장 크게 나타남을 알 수 있는데 그것은 세라믹 공구의 공구각이 음의 경사각을 갖는데 기인한다. 그러므로 세라믹 공구 제작시 결정립의 성장 방향을 배분력 방향과 수직으로 성장하도록 설계해야 배분력으로 인한 박리 현상을 최소화 할 수 있다.

마모량 300  $\mu\text{m}$ 에 도달 할 때까지를 기준으로 각 절삭조건에서의 절삭길이가 Fig. 4에 주어졌다.

이 그림에서 알 수 있듯이 주어진  $Si_3N_4$  인서트는

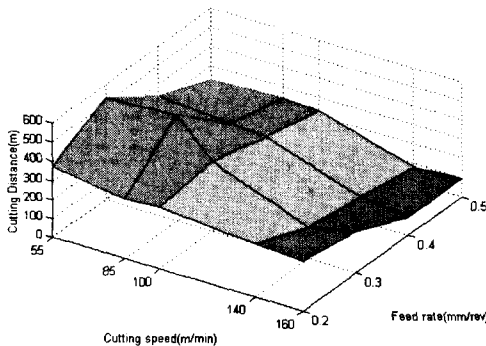


Fig. 4 Cutting distance of  $Si_3N_4$  insert until flank wear reaches 300 $\mu\text{m}$  under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (depth of cut is 0.25mm)

절삭속도  $v=55\text{m/min}$ , 이송량  $f=0.3\text{mm/rev}$ 의 조건에서 531.7m의 가공길이를 갖는 가장 우수한 마모특성을 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 따라 달라지나 보통의 작업자가 공구를 교환하고 다시 선반을 작동시키는 시간을 20초로 잡았을 때 시간 당 절삭거리는 다음 식으로 계산된다.

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

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

$$d_{\max} = nt_w \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기서,  $n$  = 시간당 사용된 insert 수,  $t_w$  = 각 insert의 마모량 300  $\mu\text{m}$ 할 때까지의 시간,  $t_c$  = 공

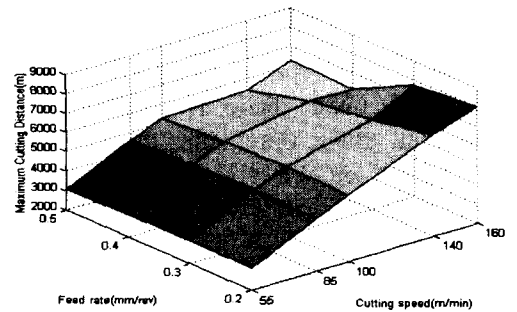


Fig. 5 Maximum cutting distance per hour of  $Si_3N_4$  insert considering insert changing time under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (depth of cut is 0.25mm)

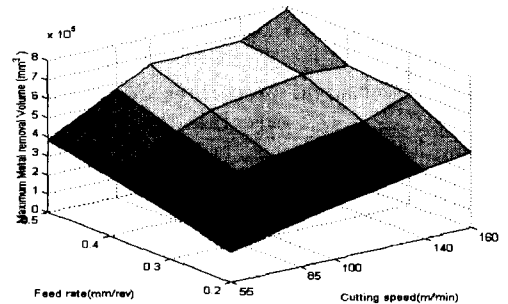


Fig. 6 Maximum cutting volume per hour of  $Si_3N_4$  insert considering insert changing time under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (depth of cut is 0.25mm)

구 교환시간,  $d_{max}$  = 시간당 최대 절삭거리 식 (1)을 이용하여 계산한 시간당 최대절삭거리가 Fig. 5에 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. 6에서 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 고려할 때 이송량이 적은 것이 표면 조도가 좋아지므로 절삭속도  $v=160\text{m/min}$ , 이송량  $f=0.2\text{mm/rev}$ 의 조건으로 실험을 수행하였다.

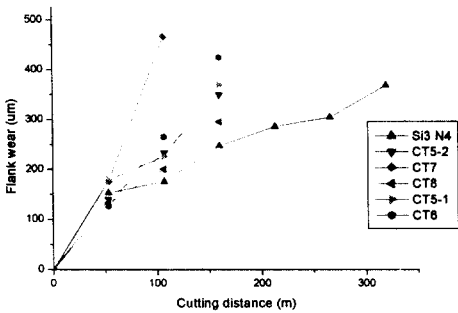


Fig. 7 Flank wear curve of various inserts during machining heat treated SCM440 (Cutting speed : 160m/min, feed rate = 0.2mm/rev, depth of cut = 0.25mm)

Fig 7은 절삭속도  $v=160\text{m/min}$ , 절삭깊이  $d=0.25\text{mm}$ , 이송량  $f=0.2\text{mm/rev}$ 의 조건에서 절삭결과를 나타낸 것이다. CT 3-1 ( $\text{SiC}$ )과 CT 4 ( $\text{SiC}-\text{TiC}$ )는 절삭직후 파손되었고, 상대적으로 소결시간이 짧은 CT7과 CT6은 초기부터 급격히 마모가 진행되어 정상적인 절삭가공이 어려운 것을 알 수 있으며, 상대적으로 소결시간이 긴 CT5-1, CT5-2, CT8은 초기에 AS 10과 유사한 내마모성을 나타내지만, 80m 이후로 CT8 보다 소결시간이 짧은 CT5-1과 CT5-2가 급격히 마모가 된다.

#### 4. 결론

$\text{Si}_3\text{N}_4$ 공구와  $\text{SiC}-\text{Si}_3\text{N}_4$ 계 세라믹 공구를 열처리한 SCM 440을 공작물로 하여 절삭특성을 비교, 검토하기 위해, CT-series를 제조하여 기계적 성질을 평가하고, 선삭 가공에 있어서 절삭조건별 각 공구의 절삭특성에 대하여 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열처리한 SCM 440을 건식절삭할 경우,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  공구의 절삭조건 변화에 따른 공구 수명곡선을 구하였다.
- 2)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 공구에서 공구 교환시간을 고려하여, 시간당 최대 절삭거리를 얻었다.
- 3) 소결시간이 다른 5가지  $\text{SiC}-\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic을 2)에서 구한 절삭조건에 의하여 실험하였다.
- 4)  $\text{SiC}-\text{Si}_3\text{N}_4$ 계 ceramic 공구중 소결시간이 가장 긴 CT8이  $\text{Si}_3\text{N}_4$  공구와 근접한 결과를 보이고, 소결시간이 짧을수록, 더 빨리 마모가 발생하였다.

#### 5. 참고문헌

- [1] ELIZABETH R., etc. "Machining with  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiC}$ -Whisker Cutting Tools," Ceram. Bulletin, Vol. 67, No. 6, pp.1016-1019, 1988
- [2] E. Dow Whitney, Pallavoor N. Vaidyanathan, "Microstructural Engineering of Ceramic Cutting Tools," Ceram. Bulletin, Vol. 67, No. 6, pp.1010-1014, 1988
- [3] Bas Kerkwijk, Jaco J.C. Buizert and Henk Verweij, "Tribological Tests Verify Wear resistance," The American Ceramic Society Bulletin, pp.49-53, Jan. 2000
- [4] M. Szafran, E. Boyryk, D. Kukra, A. Olszyna,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiC}$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$  composites intended for the edges of cutting tools," Ceramics international 26, PP.579-582, 2000
- [5] A. Krell, Paul Blank, Lutz-Michael Berger, Volkmar Richter, "Alumina Tools for Machining Chilled Cast Iron, Hardened Steel," The American Ceramic Society Bulletin, pp.65-73, Dec. 1999
- [6] David Bordue, "Hard Part Machining with Ceramic Inserts," Ceramic Bulletin Vol. 67, No. 6, pp.998-1001, 1988
- [7] Steven F. Wayne, 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
- [8] Hans K. Tonshoff, Sven Bartsch, "Wear Mechanism of Ceramic Cutting Tool," Ceramic Bulletin Vol. 67, No. 6, pp.1020-1025, 1988