

현장인화 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합재료의 절삭성능 평가  
(Cutting characteristic of in situ toughened SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite)

김경재\*, 박준석\*(시립대원), 권원태\*\*(시립대 정밀기계공학과), 김영욱\*\*\*(시립대 재료공학과)  
K. J. Kim, J. S. Park, W. T. Kwon, Y. W. Kim  
University of seoul, Chun-nong-dong 90, Seoul, Korea

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.

1. 서론

세라믹 공구는 일반적으로 초경공구 비해 낮은 인성과 열 충격 저항을 가지고 있으므로 공구 파손이 잘 발생한다. 반면 세라믹 공구는 높은 내마모성과 고온경도, 화학적 안정성 등의 특성 때문에 마모가 잘 발생하지 않으므로 높은 경도의 공작물에 적은 절삭깊이와 이송량을 주어 고속절삭에 주로 사용된다. 세라믹 공구의 파괴저항과 마모저항을 증가시키기 위한 연구결과들을 각 특성별로 정리하면 Table I과 같다.

세라믹공구로 가장 많이 사용되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 인성의 증가를 위하여 가장 널리 사용되는 방법은 다른 성질을 갖는 세라믹을 섞거나 고용체를 만든

는 방법 등이 소개되었다. 낮은 열팽창계수의 높은 열전도율을 갖는 SiC를 털(whisker)형태로 섞어서 인성을 높인 SiC-whiskered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 Ni 계 합금인 Inconel 718을 절삭하는데 우수한 성능을 보인다. [1] Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 ZrO<sub>2</sub>를 섞은 공구는 ZrO<sub>2</sub>가 응력을 받으면 결정구조가 정방정계에서 단사정계로 변화하면서 부피가 팽창하고 결과적으로 압축응력을 형성하여 공구의 파괴저항이 향상된다. [2, 3] 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>에 Si 대신 N, N 대신 O를 치환시켜 인성을 더욱 증가시킨 SIALON도 개발되었다. [1] Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 같이 열 팽창이 적은 물질에 경도가 크고 열팽창계수가 높은 TiC를 섞음으로써 열을 받을 때 서로 다른 열팽창율로 응력을 발생시켜 파괴인성을 증가시키는 방법도 개발되었다. [4]

세라믹공구를 초경공구와 비교할 때 갖는 가장 큰 단점 중의 하나가 낮은 열충격저항이다.

열충격저항은  $\frac{\sigma a}{\alpha E}$  ( $\sigma$ :열전도율  $a$ :파괴인성  $\alpha$ :열팽창율  $E$ :영률)로 표시되는데, 세라믹의 경우 초경공구에 비하여 열전도율과 파괴인성은 낮고 열팽창율과 영률은 크기 때문에 열 충격저항이 낮게 나타난다.

결과적으로 세라믹공구에서는 절삭력에 의한 파괴보다는 열충격에 의한 파괴가 더 많이 발생한다. 열충격저항을 늘리기 위해서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 높은 열전도율과 낮은 열팽창율을 갖는 SiC를 섞는 방법 [1], 기본적으로 낮은 열전도율과 높은 파괴인성, 높은 열전도율의 특성이 있는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 모재로 사용한 세라믹 공구를 만드는 방법 [2]등이 있다. 하지만, SiC와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>는 둘 다 Fe와 반응하는 성질이 있어 화학적 안정성이 떨어진다. 열충

Table 1

|   | Characteristics   | Composition   | etc.   |
|---|---|---|--|
| T<br>o<br>o<br>l<br><br>F<br>r<br>a<br>c<br>t<br>u<br>r<br>e  | Increment of Toughness                                  | 1) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiC whisker[1]   | SiC : low thermal expansion<br>high thermal conductivity                       |
|   |   | 2) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub> [2, 3]  | ZrO <sub>2</sub> : stress → volume expansion → increment of fracture toughness |
|   |   | 3) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC[2]   |  |
|   |   | 4) SiAlON [1]   | 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[4]          | addition of high conductivity material(TiC) → increment of fracture toughness  |
| Thermal shock resistance<br>$(= \frac{\sigma a}{\alpha E})$<br>$\sigma = \text{thermal conductivity}$<br>$a = \text{fracture toughness}$<br>$\alpha = \text{thermal expansion}$<br>$E = \text{Young's modulus}$ | 1) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiC whisker[1]       | SiC : low thermal expansion<br>high thermal conductivity<br>decrement of chemical inertness                       |  |
|   | 2) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Based composition [2] | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> : low thermal conductivity<br>high fracture toughness<br>high thermal conductivity |  |
| T<br>o<br>o<br>l<br><br>W<br>e<br>a<br>r  | Hardness  | 1) Grain size control[5]  | Decrement of toughness   |
|   |   | 2) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiC whisker[1]   | Decrement of chemical inertness  |
|   |   | 3) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC whisker[6]   | Insufficient fracture toughness  |
|   | Chemical inertness                                      | Chemical reaction of SiC, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> with Fe  |  |
| Thermally induced wear  | Wear caused by thermal shock[8]                         | Depth of cut notch (d.o.c. notch)   |  |

격에 의한 공구 파괴 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 나타나는데 이는 위에서 소개한 열충격저항  $\frac{\sigma a}{\alpha E}$  의 역순에 비례하는데 이로써 열충격과 공구파괴는 밀접한 관계에 있는 것을 알 수 있다. [7] 세라믹 공구는 초경공구에 비해 경도가 뛰어나고 화학적으로 안정되어 있기 때문에 내 마모성이 뛰어난 것으로 알려졌다.

세라믹 공구에서 발생하는 마모에는 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 열충격량과 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 인성이나 화학적 안정성을 감소시키기 때문에 [1, 5] 그 한계를 명확히 하여야 한다. 화학적 반응에 의한 마모는 주로 SiC나 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 포함하는 세라믹 공구에서 발

생하는데, 그 이유는 SiC와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>가 Fe와 반응하기 때문이다. 이런 이유 때문에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC whisker 공구는 Ni 계 합금이 Inconel 718을 가공하는데 최고의 성능을 나타내지만, 철합금을 가공할 때는 높은 정도에도 불구하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC보다 마모량이 크다. 열에 의한 마모는 Depth Of Cut wear (이하 D.O.C. wear)가 있는데 이것은 절삭하는 공작물의 표면과 공구가 만나는 지점에서 발생한다. D.O.C. wear는 절삭에 참여하는 부분과 참여하지 않는 부분의 경계로 커다란 온도 차이가 존재하게 되고, 이 온도 차이는 열충격의 차이를 유도하고 결과적으로 공구는 열응력을 계속 받게 되어 마모가 발생하게 된다. 이는 세라믹공구가 열충격에 의하여 파괴가 발생하는 것과 같은 원리이다.

## 2. 실험장치 및 방법

절삭특성 비교시험에 사용된 공구는 세라믹 insert중에서 많이 사용되고 있는 상용제품인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 공구와 (AS10 : Taegu Tec) 이번에 새로 개발 중인 CT-series이다. CT-series중 CT3-1은 순수 SiC로만 이루어져 있고, CT4는 SiC/TiC 조성이며 CT5-1, CT5-2, CT6, CT7, CT8은 같은 조성(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC)으로 이루어져 있으나 소결 시간과 화학적 구성이 서로 다르다.

절삭가공 실험에 사용한 공작기계는 400×600 선반이며, 각 절삭공구는 SNGN 120416이고, Tool Holder는 절입각이 45° 인 CSDNN 2525M 12CEA을 사용하였다. 기준절삭조건을 선정하기 위하여 절삭깊이 d=0.25mm, 절삭속도 v=55~160m/min, 이송량 f=0.2~0.5mm/rev로 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>공구를 이용하여 열처리한 SCM440 (AISI4140, HRC=58)을 절삭하였으며, 가장 우수한 마모특성을 보인 조건에서 CT-Series를 이용하여 절삭 실험하였다. 모든 실험은 건식 절삭으로 실험하였으며, 공구 현미경을 이용하여 공구의 플랭크면 평균 마모량을 측정하고, 절삭 실험동안 Kistler사의 9257B 공구동력계를 이용하여 절삭력을 측정된 후 HS-DAS 12 보드를 통해 A/D변환을 거쳐 586PC에 저장하였다.

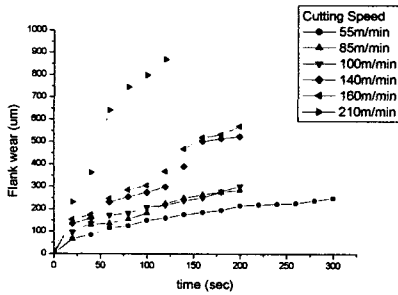
### 3. 실험결과 및 고찰

Table 2는 준비된 시편의 기계적 성질을 측정하여 나타내었다. 이 표에서 알 수 있듯이 준비된 세라믹 시편들은  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 인서트와 비교하여 유사하거나 약간 낮은 파괴 강도, 높은 경도와 영률을 가지고 있음을 알 수 있다.

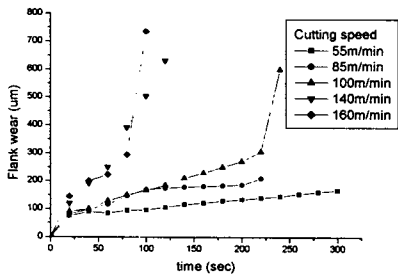
Table 2. Mechanical properties of cutting tool materials

| Tool materials          | Flexural Toughness<br>MPam <sup>1/2</sup> | Hardness<br>kg/mm <sup>2</sup> | Young's Modulus<br>Gpa | Poission's Ratio | Bulk Density<br>g/cm <sup>3</sup> |
|-------------------------|---|--------------------------------|------------------------|------------------|-----------------------------------|
| $\text{Si}_3\text{N}_4$ | 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                             |

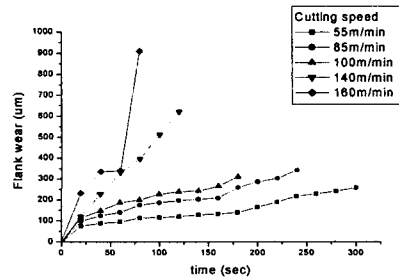
Fig. 1은 절삭속도 55~160m/min, feed rate 0.2~0.5에서의 flank wear curve를 나타낸다. 절삭속도와 이송량이 증가함에 따라 마모가 증가하는 경향을 보이며, 이송량  $f=0.3\text{mm/rev}$ 에서 다른 이송량에 비교해 우수한 마모특성을 보였다.



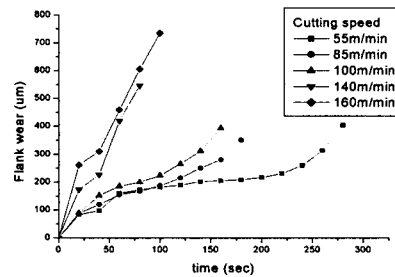
(i) feed rate 0.2 mm/rev



(ii) feed rate 0.3 mm/rev



(iii) feed rate 0.4 mm/rev

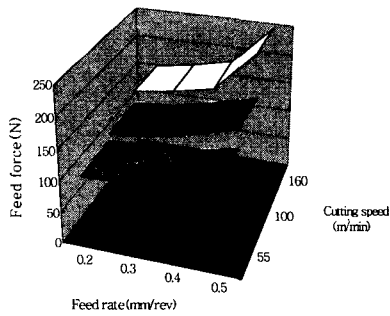


(iv) feed rate 0.5 mm/rev

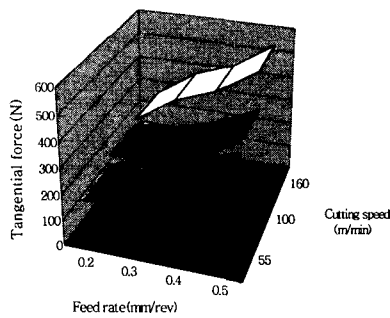
Fig. 1 Flank wear curve of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed and feed rate (D.O.C = 0.25mm)

Fig. 2는 feed rate에 따른 절삭력의 크기를 나타내었다. 이송량이 커짐에 따라 절삭력이 증가하고 대체적으로 배분력이 가장 크게 나타남을 알 수 있는데 그것은 세라믹 공구의 공구각이 음의 경사각을 갖는데 기인한다. 그러므로 세라믹 공구 제작 시 결정립의 성장 방향을 배분력 방향과 수직으로 성장하도록 설계해야 배분력으로 인한 박리 현상을 최소화 할 수 있다. 일반적으로 Tangential force는 공작물의 회전으로 인해 발생하며, Radial force는 절삭깊이에 대한 공작물의 저항 그리고 Feed force는 feed rate에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. [6]

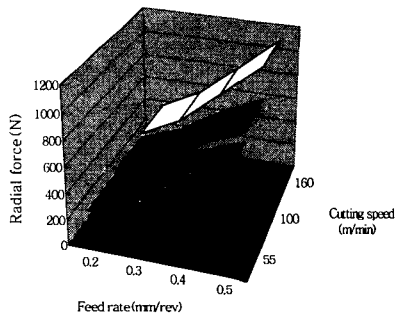
마모량  $300\ \mu\text{m}$ 에 도달 할 때까지를 기준으로 각 절삭조건에서의 절삭거리가 Fig.3에 주어졌다. 이 그림에서 알 수 있듯이 주어진  $\text{Si}_3\text{N}_4$  공구는 절삭속도  $v=55\text{m/min}$ , 이송량  $f=0.3\text{mm/rev}$ 의 조건에서 531.7m의 가공길이를 갖는 가장 우수한 마모특성을 보였다.



(i) Feed force



(ii) Tangential force



(iii) Radial force

Fig. 2 Cutting force Variation during machining heat treated SCM440 under different cutting conditions when flank wear is  $300\ \mu\text{m}$  (D.O.C = 0.25mm)

하지만, 실제 생산현장에서는 주어진 공구로 절삭할 수 있는 가공길이를 최대화하는 것보다 주어진 시간에 가장 많은 거리를 절삭하는 것이 생산성 측면에서 더욱 중요하다. 그러므로 생산성을 나타내는 시간 당 절삭거리가 더욱 중요하다.

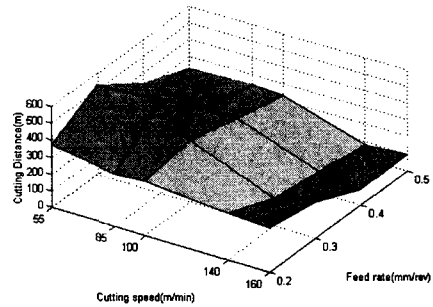


Fig. 3 Cutting distance of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  insert until flank wear reaches  $300\ \mu\text{m}$  under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (D.O.C=0.25mm)

공구교환시간은 작업자에 따라 달라지나 보통의 작업자가 공구를 교환하고 다시 선반을 작동시키는데 걸리는 시간을 20초로 잡았을 때 시간 당 절삭거리의 다음 식으로 계산된다.

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

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

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

여기서,  $n$  = 시간당 사용된 insert 수,  $t_w$  = 각 insert의 마모량  $300\ \mu\text{m}$ 할 때까지의 시간,  $t_c$  = 공구 교환시간,  $d_{\max}$  = 시간당 최대 절삭거리식 (1)을 이용하여 계산한 시간당 최대절삭거리가 Fig. 4에 주어졌다.

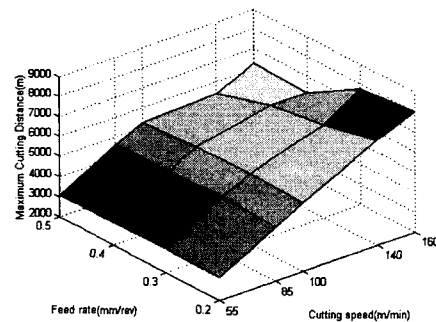


Fig. 4 Maximum cutting distance per hour of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  insert considering insert changing time under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (D.O.C = 0.25mm)

결과적으로 절삭속도  $v=160\text{m/min}$ , 이송량  $f=0.2\text{mm/rev}$ 의 조건일 때 시간당 최대 절삭거리가  $8017.7\text{m}$ 로 가장 길었다.

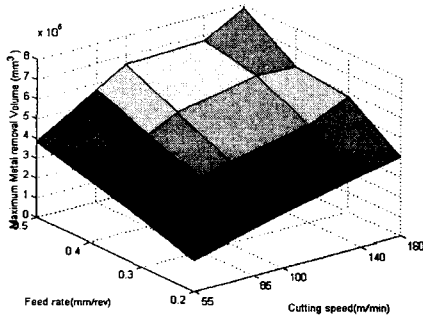


Fig. 5 Maximum cutting volume per hour of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  insert considering insert changing time under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (D.O.C = 0.25mm)

실제로 절삭한 부피는 Fig. 5에서 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. 6은 단위 시간 당 사용된 공구의 개수를 나타낸다.

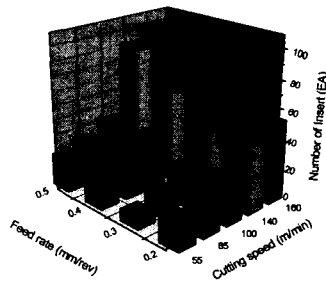


Fig. 6 Number of insert used in an hour under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (D.O.C = 0.25mm)

Fig. 7 은 절삭속도  $v=160\text{m/min}$ , 절삭깊이  $d=0.25\text{mm}$ , 이송량  $f=0.2\text{mm/rev}$ 의 조건에서 절삭 결과를 나타낸 것이다. CT 3-1 ( $\text{SiC}$ )와 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  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 와 유사한 내마모성을 나타내지만,  $80\text{m}$  이후로 CT8 보다 소결 시간이 짧은 CT5-1과 CT5-2가 급격히 마모가 되는 것을 알 수 있다.

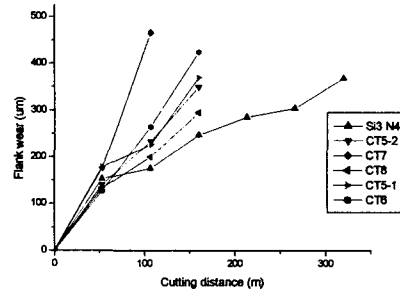
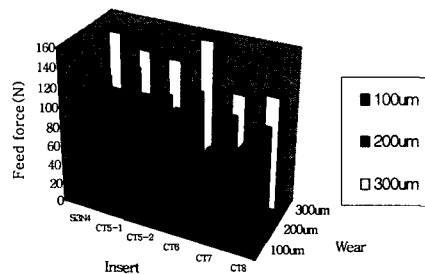
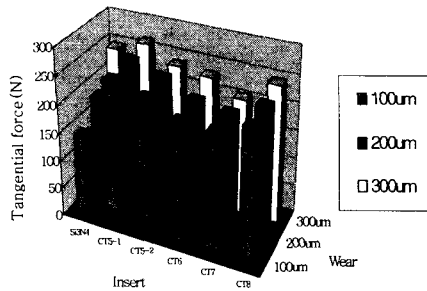


Fig. 7 Flank wear curve of various inserts during machining heat treated SCM440 (Cutting speed =  $160\text{m/min}$ , feed rate =  $0.2\text{mm/rev}$ , D.O.C = 0.25mm)

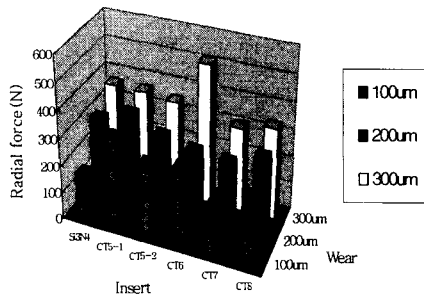
Fig. 8 은 절삭속도  $v=160\text{m/min}$ , 절삭깊이  $d=0.25\text{mm}$ , 이송량  $f=0.2\text{mm/rev}$ 의 조건에서의 절삭력의 크기를 나타내었다. CT-Series도 음의 경사각을 가지므로 배분력이 가장 크게 나타나며, 마모량이 증가함에 따라 약간의 절삭력의 증가가 있음을 알 수 있다. CT3-1( $\text{SiC}$ )과 CT4( $\text{SiC}/\text{TiC}$ )는 절삭 초기에 failure가 발생하므로, 절삭력을 측정 할 수가 없었다.



(i) Feed force



(ii) Tangential force



(iii) Radial force

Fig. 8 Cutting force variations during machining heat treated SCM440 (Cutting speed = 160m/min, feed rate = 0.2mm/rev, D.O.C = 0.2mm)

#### 4. 결론

$Si_3N_4$  공구와  $SiC-Si_3N_4$  계 세라믹 공구를 열처리한 SCM 440을 공작물로 하여 절삭특성을 비교, 검토하기 위해, CT-series를 제조하여 기계적 성질을 평가하고, 선삭가공에 있어서 절삭조건별 각 공구의 절삭특성에 대하여 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열처리한 SCM 440을 공작물로 사용하였을 경우,  $Si_3N_4$  공구의 절삭조건 변화에 따른 공구 수명곡선을 구하였다.
- 2)  $Si_3N_4$  공구에서 공구 교환시간을 고려하여, 시간당 최대 절삭거리를 얻었다.
- 3) 각각 다른 소결시간으로 만들어진 5가지  $SiC-Si_3N_4$  복합재료를 2)에서 구한 절삭조건에 의하여 실험하였다.

4)  $SiC-Si_3N_4$  계 ceramic 공구중 소결시간이 가장 긴 CT8이  $Si_3N_4$  공구와 근접한 결과를 보이고, 소결시간이 짧을수록, 더 빨리 마모가 발생하였다.

#### 5. 참고문헌

- [1] ELIZABETH R., etc. "Machining with  $Al_2O_3-SiC$ -Whisker Cutting Tools," Ceram.Bulletin, Vol. 67, No. 6, pp.1016-1019, 1988
- [2] E. Dow Whitney, Pallavoore 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, " $Si_3N_4-Al_2O_3-TiC-Y_2O_3$  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 Bordui, "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