

## SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹공구의 소결시간과 조성변화가 절삭특성에 미치는 영향

Effect of Sintering Time and Composition on Cutting Characteristics of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramic Tool

박준석\*, 김경재, 이성구(시립대원), 권원태(시립대 기계정보공학과), 김영욱(시립대 재료공학과)

J. S. Park, K. J. Kim, S. K. Lee, W. T. Kwon, Y. W. Kim  
University of Seoul, Chun-nong-dong 90, Seoul, Korea

### Abstract

In the present study, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC ceramic composites that contained up to 20 wt% of dispersed SiC particles were fabricated via hot-pressing with an oxynitride glass. The microstructure, the mechanical properties, and the cutting performance of resulting ceramic composites were investigated. By fixing the composition as Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-20 wt% SiC, the effect of sintering time on the microstructure, the mechanical properties, and the cutting performance were also investigated. For machining of gray cast iron, the tool life increases with increasing the amount of SiC content in the composites; The tool life also increased with increasing the sintering time. The tool life of the home-made cutting tools was very close to that of commercial Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> cutting tool. The superior cutting performance of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC ceramic cutting tools suggests the possibility to be a new ceramic tool material.

### 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 마모 방지를 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 절삭 깊이와 이송량을 주어 고속으로 절삭하는데 많이

사용된다. 세라믹 공구는 초경공구에 비해 인성과 열 충격저항이 떨어진다. 인성증가를 위해 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 변화하면서 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 인성이나 화학적 안정성을 감소시키기 때문에 [1, 5] 그 한계를 명확히 하여야 한다. 화학적 반응에 의한 마모는 주로 SiC 나 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 포함하는 세라믹 공구에서 발생하는 데 그 이유는 SiC와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>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 세라믹 공구 중, 고속가공과, 경도가 높은 공작물의 가공에 적절한 성능을 보이는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 공구와 이번에 새로 개발한 SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>계 세라믹 공구 (SCN-시리즈)의 소결시간과 SiC 첨가량에 따른 절삭 성능을 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

절삭특성 비교시험에 사용된 시편의 powder로 β-SiC powder (Betarundum, Ultrafine grade, Ividen, Tokyo, Japan)는 평균 입경 0.28 μm, 순도 99%이상이었으며, α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder (Grade E 10, Ube Industries, Tokyo, Japan)와 β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder (Grade SN-P21FC, Denkikagaku, Tokyo, Japan), 소결첨가제로

SiO<sub>2</sub> (reagent grade, Kanto Chemical Co., 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) powder를 혼합한 G1을 사용하였다. 각 샘플들은 메틸 알콜 중에서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>불을 첨가하여 24시간 혼합하였으며, 80℃의 건조기에서 8시간동안 건조시키고, 60메시체를 통과시켜 과립화 하였다. 각 샘플에 따라서 표 1에서 보이는 것처럼, β-SiC 양과 압축시간을 변화시켜 25Mpa하의 N<sub>2</sub> 분위기에서 소결하여 시편을 만든 후 SNGN 120416의 크기로 시편을 가공하여 완성하였다.

절삭특성 비교시험에 사용된 공구는 세라믹 인서트 중에서 많이 사용되고 있는 상용제품인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 공구와 (AS10 : Taegu Tec) 새로 개발 중인 SCN시리즈이다. SCN 시리즈 중 SCN1-20, SCN2-20, SCN4-20, SCN8-20, SCN12-20, SCN16-20, SCN24-20은 조성은 같지만 (β-SiC : 20wt%, α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> : 71wt%, β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> : 1wt%, G1 : 8wt%) 소결 시간은 1~24시간으로 각각 다르다. SCN8-5, SCN8-10, SCN8-20, SCN8-25, SCN8-30은 소결시간은 8시간으로 동일 하지만, SiC의 양이 5~30wt%로 다르다.

절삭가공 실험에 사용한 공작기계는 400×600 선반이며, 각 절삭공구의 형태는 SNGN 120416이고, 공구 홀더는 절입각이 45°인 CSDNN 2525M 12CEA Type을 사용하였다. 기준절삭조건을 선정하기 위하여 절삭깊이 d=0.25mm, 절삭속도 v=55m/min, 85m/min, 100m/min, 140m/min, 160m/min, 이송량 f=0.2mm/rev, 0.3mm/rev, 0.4mm/rev, 0.5mm/rev의 조건에서 상용 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 인서트를 이용하여 열처리한 고경도 SCM 440 (AISI4140, HRC=58)을 절삭하였으며, 공구 교환시간을 고려한 시간당 최대 절삭거리를 보인 조건에서 SCN시리즈로 절삭 실험을 하였다. 또한, 열처리한 SCM 440보다 경도가 낮은 회주철(Gray cast iron, 180~

Table 1. List of Composition and Sintering Condition

| Sample   | Batch (wt%) |                                  |                                  |    | Sintering Condition |      |          |
|----------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|----|---------------------|------|----------|
|          | β-SiC       | α-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | β-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | G1 | Temperature         | Time | Pressure |
| SCN1-20  | 20          | 71                               | 1                                | 8  | 1760℃               | 1hr  | 25Mpa    |
| SCN2-20  | 20          | 71                               | 1                                | 8  | 1760℃               | 2hr  | 25Mpa    |
| SCN4-20  | 20          | 71                               | 1                                | 8  | 1760℃               | 4hr  | 25Mpa    |
| SCN8-5   | 5           | 86                               | 1                                | 8  | 1760℃               | 8hr  | 25Mpa    |
| SCN8-10  | 10          | 81                               | 1                                | 8  | 1760℃               | 8hr  | 25Mpa    |
| SCN8-20  | 20          | 71                               | 1                                | 8  | 1760℃               | 8hr  | 25Mpa    |
| SCN8-25  | 25          | 66.06                            | 0.94                             | 8  | 1760℃               | 8hr  | 25Mpa    |
| SCN8-30  | 30          | 61.13                            | 0.87                             | 8  | 1760℃               | 8hr  | 25Mpa    |
| SCN12-20 | 20          | 71                               | 1                                | 8  | 1760℃               | 12hr | 25Mpa    |
| SCN16-20 | 20          | 71                               | 1                                | 8  | 1760℃               | 16hr | 25Mpa    |
| SCN24-20 | 20          | 71                               | 1                                | 8  | 1760℃               | 24hr | 25Mpa    |

250HB)을 상용  $Si_3N_4$  인서트의 추천 절삭속도 중의 하나인 절삭속도  $v=3305\text{m/min}$ 와 이송량  $f=0.2\text{mm/rev}$ , 절삭깊이  $d=0.5\text{mm}$ 의 조건에서도 절삭특성 비교실험을 행하였다. 모든 절삭 실험은 건식 절삭으로 실험하였으며, 절삭 실험동안 Kistler사의 9257B 공구동력계를 이용하여 절삭력을 측정한 후 HS-DAS 12 보드를 통해 A/D 변환을 거쳐 586PC에 저장하였다. 공구 현미경을 이용하여 공구의 플랭크면 평균 마모량을 측정하고, 플랭크면 마모량이  $300\ \mu\text{m}$ 이 되었을 때까지의 시간을 공구수명시간으로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에 사용한 절삭공구의 주요 기계적 성질을 측정하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Mechanical properties of cutting tool materials

| Sample    | Flexural Toughness ( $MPa\text{m}^{1/2}$ ) | Hardness (Gpa) | Poisson's Ratio | Bulk Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |
|-----------|--|----------------|-----------------|---|
| $Si_3N_4$ | 6.0  |                | 0.27            | 3.2                                     |
| SCN1-20   | $4.5\pm 0.2$                               | 16.4           | 0.292           | 3.154                                   |
| SCN2-20   | $5.2\pm 0.3$                               | 16.2           | 0.283           | 3.14                                    |
| SCN4-20   | $4.7\pm 0.1$                               | 16.6           | 0.277           | 3.175                                   |
| SCN8-5    | $6.5\pm 0.2$                               | 14.9           |                 |   |
| SCN8-10   | $5.7\pm 1.2$                               | 15.5           |                 |   |
| SCN8-20   | $4.7\pm 0.2$                               | 16.3           |                 | 3.177                                   |
| SCN12-20  | $5.5\pm 0.1$                               | 16.2           |                 |   |

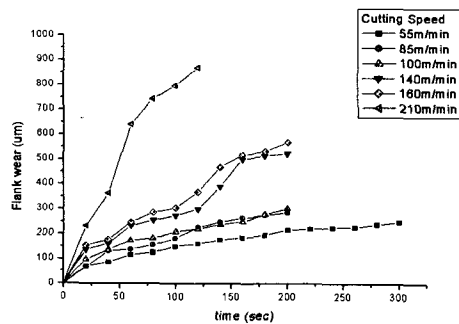


Fig. 1 Flank wear curve of  $Si_3N_4$  insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with  $0.2\text{mm/rev}$  feed rate and  $0.25\text{mm}$  depth of cut

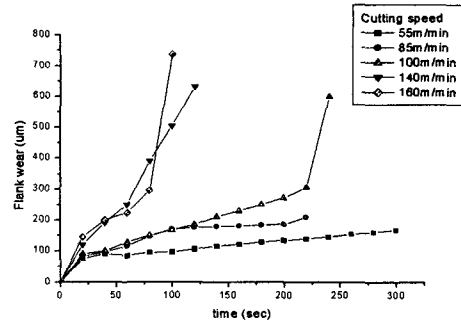


Fig. 2 Flank wear curve of  $Si_3N_4$  insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with  $0.3\text{mm/rev}$  feed rate and  $0.25\text{mm}$  depth of cut

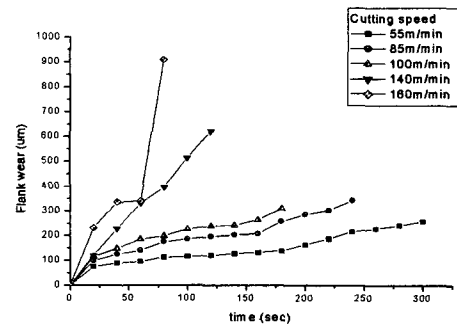


Fig. 3 Flank wear curve of  $Si_3N_4$  insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with  $0.4\text{mm/rev}$  feed rate and  $0.25\text{mm}$  depth of cut

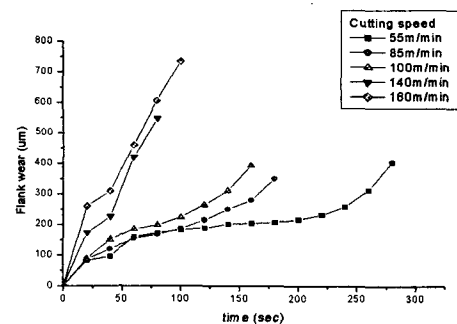


Fig. 4 Flank wear curve of  $Si_3N_4$  insert during machining heat treated SCM440 under various cutting speed with  $0.5\text{mm/rev}$  feed rate and  $0.25\text{mm}$  depth of cut

이 표에서 알 수 있듯이 준비된 세라믹 시편들은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>인서트와 비교하여 유사하거나 약간 낮은 파괴 강도, 높은 경도와 영률을 가지고 있음을 알 수 있다.

기준절삭조건을 선정하기 위하여, 상용제품인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 공구(AS10 : Taegu Tec)의 절삭 실험을 우선 행하였다. 절삭속도가 210m/min 일 때 채터가 발생하기 때문에 최고 절삭속도를 160m/min으로 제한하였다. 실험결과 Fig. 1에서 4까지 볼 수 있듯이 55~160m/min의 절삭속도 범위에서 절삭속도가 증가함에 따라 마멸이 빠르게 진행하였다. 이송량이 증가할 때도 마모량이 증가하였지만, 이송량 f=0.3mm/rev에서 다른 이송량에 비교해 우수한 마멸특성을 보였지만, 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.

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

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

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

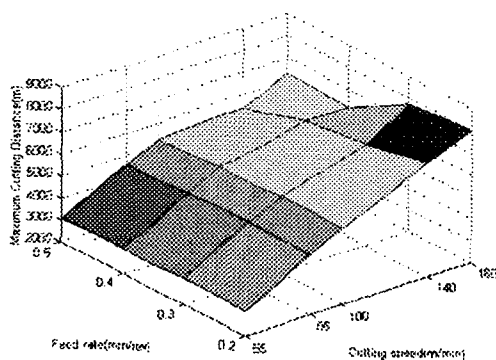


Fig. 5 Maximum cutting distance per hour of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> insert considering insert changing time under various cutting conditions during machining heat treated SCM440 (depth of cut is 0.25mm)

여기서,  $n$  = 시간당 사용된 인서트 수,  $t_w$  = 각 인서트의 플랭크면 마모량이 300  $\mu$ m 될 때까지의 시간,  $t_c$  = 공구 교환시간,  $d_{max}$  = 시간당 최대 절삭거리 그리고  $Cs$ 는 절삭속도이다. 식 (1)의 첫 번째 식과 두 번째 식은 절삭공구의 수명과 교환시간을 고려할 때 1 시간의 절삭시간 동안 사용되는 절삭공구의 개수를 계산한 것이고 세 번째 식은 그 동안의 절삭거리를 계산한 것이다. 이 절삭거리가 Fig. 5에 주어졌다. 결과적으로 절삭속도  $v=160$ m/min, 이송량  $f=0.2$ mm/rev의 조건일 때 시간당 최대 절삭거리가 8017.7mm로 가장 길었다. 실제로 절삭한 부피는 절삭속도  $v=160$ m/min, 이송량  $f=0.5$ mm/rev 일 때 최대가 되지만, 세라믹 공구가 마무리 절삭에 사용되는 것을 고려할 때 이송량이 적은 것이 표면 조도가 좋아지므로 절삭속도  $v=160$ m/min, 이송량  $f=0.2$ mm/rev의 조건을 기준절삭조건으로 결정하였고, 결과적으로 절삭속도  $v=160$ m/min, 절삭깊이  $d=0.25$ mm, 이송량  $f=0.2$ mm/rev의 조건에서 상용 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹 공구로 SCM440을 절삭할 때 최대생산성을 나타내므로, 이 조건에서 현재 개발중인 SCN-시리즈 인서트와 절삭성능 비교실험을 하였다. 소결 시간을 8시간으로 고정하고, SiC의 양을 5~30wt%로 다르게 만든 SCN 시리즈 인서트와 상용 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹 공구의 절삭특성을 비교한 결과가 Fig. 6에 주어졌다. 상대적으로 SiC 양이 적은 SCN8-5의 경우 초기부터 급격히 마모가 진행되어, 절삭 후 25초 이내에 플랭크면 마모량이 300 $\mu$ m를 넘었지만, SiC의 양이 늘어날 수록 Tool life가 길어졌고, SCN8-20의 경우에, 상용 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹 인서트에 거의 근접하는 최대의 공구수명 시간을 얻을 수 있었다. 하지만, SiC 양이 25wt% 이상 늘어나면, 공구 수명시간은 다시 줄어들었다. Fig. 7은 위의 결과를 근거로 해서, SiC의 양을 20wt%로 고정하고, 소결시간을 1~24시간까지 다르게 소결한 SCN 시리즈와 상용 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹 인서트의 절삭특성 비교실험 결과이다. 그림에서 보이는 것처럼 상대적으로 소결시간이 짧은 SCN1과 SCN2는 초기부터 급격히 마멸이 진행되어 정상적인 절삭가공이 어려운 것을

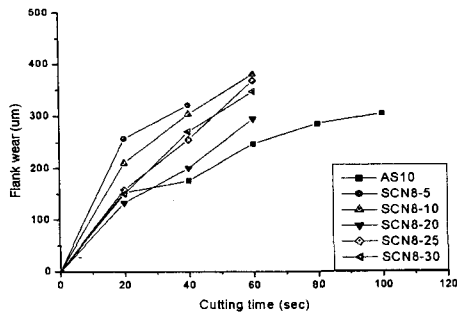


Fig. 6 Flank wear curve of different SiC contents SCN-series insert during machining heat treated SCM440 under 160m/min cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut

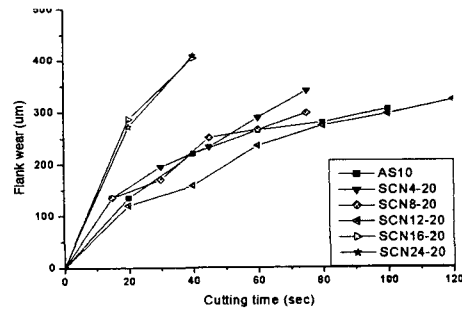


Fig. 9 Flank wear curve of different sintering time SCN-series insert during machining gray cast iron under 330m/min cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.5mm depth of cut

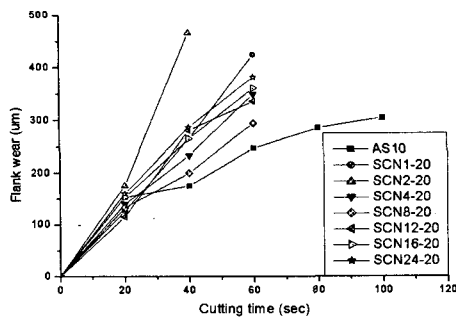


Fig. 7 Flank wear curve of different sintering time SCN-series insert during machining heat treated SCM440 under 160m/min cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut

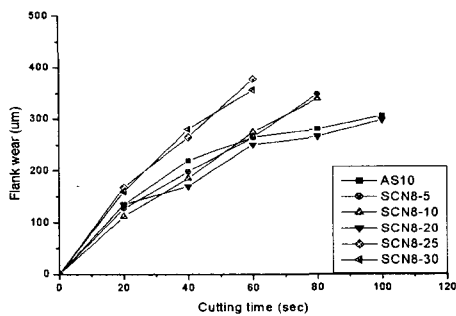


Fig. 8 Flank wear curve of different SiC contents SCN-series insert during machining gray cast iron under 330m/min cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.5mm depth of cut

알 수 있으며, 상대적으로 소결시간이 긴 SCN4, SCN8은 초기에  $Si_3N_4$  유사한 내마모성을 나타내지만, 절삭 20초 이후로 SCN8 보다 소결 시간이 짧은 SCN4가 급격히 마멸이 된다. 비교적 높은 강도를 가진 SCN 시리즈 중에서 경도와 파괴인성이 높은 SCN8-20의 수명이 긴 것으로 나타났고, 소결 시간이 8시간 이상이 되면, 공구 수명은 다시 줄어들었다.

Fig. 8에 열처리한 SCM 440보다 경도가 낮은 회주철(180~250HB)을 공작물로 사용하여, 상용  $Si_3N_4$  세라믹 인서트의 추천절삭조건 ( $v=300\sim 500m/min$ ,  $d=0.3\sim 0.8mm$ )중의 하나인 절삭속도  $v=330m/min$ , 이송량  $f=0.2mm/rev$ , 절삭깊이  $d=0.5mm$ 의 조건하에서 소결 시간을 8시간으로 고정하고, SiC의 양을 5~30wt%로 다르게 만든 SCN 시리즈 인서트와 공구수명을 비교하였다. 열처리한 SCM 440의 경우와 마찬가지로 SiC 첨가량이 20wt%일 때 최대의 공구수명을 얻을 수 있었다. Fig. 9는 첨가한 SiC양을 20wt%로 하고, 소결 1~24시간으로 한 SCN 시리즈 인서트 공구수명을 나타내었다. 소결시간이 늘어 날수록의 공구수명이 길어지고, 소결시간이 12시간인 SCN12-20 인서트에서 SCN8-20보다 공구 수명이 긴 최대의 공구수명을 얻을 수 있었으며, 상용  $Si_3N_4$  세라믹 인서트보다 우수함을 알 수 있었다.

절삭특성 비교실험 중 측정된 절삭력에서 공통적으로 배분력이 가장 크게 나타났다. 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.

#### 4. 결론

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

- 1) 열처리한 SCM 440을 건식절삭할 때,  $Si_3N_4$  공구의 절삭조건 변화에 따른 공구 수명곡선을 구하였다.
- 2)  $Si_3N_4$  공구에서 공구 교환시간을 고려하여, 시간당 최대 절삭거리를 얻었다.
- 3) 소결시간의 변화와  $SiC$  첨가량에 따른  $SiC-Si_3N_4$  계 세라믹 인서트의 기계적 특성과 공구수명에 미치는 영향을 알 수 있었다.
- 4) 소결시간과  $SiC$  첨가량이 다른  $SiC-Si_3N_4$  세라믹 인서트를 2)에서 구한 절삭조건에 의하여 실험한 결과, 소결시간이 8시간이고,  $SiC$ 첨가량이 20wt%인 SCN8-20이 상용  $Si_3N_4$  세라믹 인서트와 근접한 결과를 보였다.
- 5) 회주철을 공작물로 사용하였을 경우,  $SiC$  첨가량이 20wt%이고, 소결시간이 12시간인 SCN12-20이 상용  $Si_3N_4$  세라믹 인서트보다 우수한 결과를 보였다.

#### 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, 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, " $Si_3N_4-Al_2O_3-TiC-Y_2O_3$  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-Tomislaw 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