

SiC-Si₃N₄ 세라믹공구를 위한 소결시간과 조성변화의 최적화

김경재*, 박준석*, 이성구*, 권원태**, 김영욱***

Optimization of the Sintering Time and Composition for SiC-Si₃N₄ Ceramic Tool

Kyoung Jae Kim*, June Seuk Park*, Sung Ku Lee*, Won Tae Kwon**, Young Wook Kim***

Abstract

In the present study, Si₃N₄-SiC ceramic composites that contained up to 30 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 Si₃N₄-20wt% SiC, the effect of sintering time on the microstructure, the mechanical properties and the cutting performance were also investigated. The longer sintering time is, the bigger the grain size of SiC is. The fracture toughness(K_{IC}) of the Si₃N₄-SiC ceramic composites increased with the increase of grain size, while the flexural strength(σ) decreased. For machining SCM440, the insert with 20wt% SiC sintered for 8 hours showed the longest tool life while the insert with 20wt% SiC sintered for 12 hours showed the longest tool life for machining gray cast iron.

Key Words : SiC-based ceramic tool(SiC계 세라믹 공구), Tool life curvature(공구 수명 곡선), Flank wear(플랭크 마멸), Sintering time(소결시간)

1. 서 론

절삭공구재료의 개발은 절삭 속도를 높이는 방향으로 지속되어 왔으며, 이러한 과정에서 세라믹계 절삭공구는 고속 절삭용의 공구재료로서 좋은 특성을 구비하고 있다.

세라믹은 산화물, 탄화물, 질화물 등의 무기질 재료를 고온에서 소결한 것을 말하며, 최근 고경도 재료 절삭을 위한 절삭공구 제작에 많이 사용되고 있다. 세라믹계 절삭공구는 초경공구에 비해 낮은 인성과 열 충격저항이 있어서 공구파손이 잘 발생하지만 고온경도와 내마멸성이 우수

* 서울시립대 대학원
** 서울시립대 기계정보공학과(kwon@uos.ac.kr)
*** 서울시립대 재료공학과

하고 고온에서의 화학적 안정성이 풍부하므로 산화마멸과 피삭재와의 확산마멸이 잘 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 대표적인 세라믹 절삭공구의 재료는 순수한 Al_2O_3 계, Al_2O_3 -TiC계, Si_3N_4 계가 있다. 순수한 Al_2O_3 계는 담금질 강이나 철도 주철 등의 고경도 재료의 절삭에 적합하며, Al_2O_3 -TiC계는 순수한 Al_2O_3 계에 비하여 인성이 높고 절삭날의 신뢰성이 우수하다. Si_3N_4 계 세라믹은 항절력이 Al_2O_3 -TiC계보다 높고 초경공구에 대등하지만, 주로 주철의 고속 거친 가공과 Ni계 초내열 합금의 절삭에 적합하며 습식 절삭에서도 사용할 수 있다.⁽¹⁾

세라믹 절삭공구의 최대의 단점은 여리고 결손하기 쉬운 점에 있으며, 이 인성면의 단점을 개선하고 절삭날의 신뢰성이 풍부한 절삭 공구 재료의 개발을 위한 많은 연구가 행해지고 있다. 낮은 열팽창계수와 높은 열전도율을 가지고 있는 SiC를 털 모양으로 섞어서 인성을 높인 SiC-whiskered 공구는 Ni계 합금 인코넬 718을 절삭하는데 많이 사용하며, 냉간 주철과 경화된 강을 가공하는데 있어서는 전통적인 Al_2O_3 공구나 ZrO_2 와 Ti(C,N)로 강화된 복합공구를 대신하여 순수 미세 알루미늄이 우수한 절삭성능을 보이는 연구가 행해졌다.^(2,3) 또한 단일체의 Al_2O_3 에 TiB_2 를 첨가함으로써 파괴인성과 경도를 향상시키고 회주철을 절삭한 후의 접촉면에서 TiB_2 의 산화막이 형성됨으로써 이것이 윤활계의 역할을 하여 마멸표면에서 마찰계수와 마멸율이 감소한다.⁽⁴⁾

세라믹 공구에서 발생하는 마멸의 종류는 굽힘 마멸 (abrasive wear), 확산 마멸(diffusion wear), 화학적 마멸 (chemical wear), 절삭깊이 마멸(depth of cut)등이 있다. 굽힘 마멸은 공구의 경도와 관련이 있으며 경도의 증가를 위해서는 결정립의 크기를 조절하거나, SiC나 TiC를 섞는 방법이^(2,3,5) 있으나 이런 방법들은 인성이나 화학적 안정성을 감소시키기 때문에 그 한계를 명확히 하여야 한다.^(2,3) 확산 마멸과 화학적 마멸은 공구재료의 화학적 안정성과 관련이 있는데, 그 예로써 SiC나 Si_3N_4 를 포함하는 세라믹 공구는 고온에서 Fe와 반응하기 때문에 Fe 합금의 가공에는 적합하지 않다. 절삭깊이 마멸은 절삭에 참여하는 부분과 참여하지 않는 부분의 온도차에 의해 열 충격의 차이가 유도되고 결과적으로 공구는 열 응력을 계속 받게되어 마멸이 발생하는 것이다.⁽⁶⁾ 열 충격 저항을 늘리기 위해서는 공구의 열전도율과 파괴인성을 증가시키는 것이 바람직하다.

일반적으로 세라믹 공구가 가져야 할 공구의 조건은 고온경도 및 고온강도가 크고 내마멸성과 큰 인성, 충격, 굽

힘 하중을 지녀야 하며 적은 마찰 계수와 화학적 안정성을 가져야 한다.

이번 연구에서는 소결 중에 SiC결정립의 성장을 증가시키고 길게 성장된 SiC결정립 주위를 소결 조제가 림을 형성하여 감싸는 구조를 보이는 고인성 세라믹을 제조하였고, 고속가공과 경도가 높은 공작물의 가공에 적절한 성능을 보이는 상용 Si_3N_4 공구와 이번에 개발중인 SiC- Si_3N_4 계 세라믹 공구 (SCN-시리즈)를 이용하여 열처리한 고경도의 SCM440과 회주철을 선삭가공 실험하여, 소결 시간과 SiC첨가량에 따른 절삭성능을 비교 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

절삭특성 비교시험에 사용된 시편의 파우더로 β -SiC파우더 (Betarundum, Ultrafine grade, Ividen, Tokyo, Japan)는 평균 입경 0.28mm, 순도 99%이상이었으며, α - Si_3N_4 파우더 (Grade E 10, Ube Industries, Tokyo, Japan)와 β - Si_3N_4 파우더 (Grade SN-P21FC, Denkikagaku, Tokyo, Japan), 소결첨가제로 SiO_2 (reagent grade, Kanto Chemical Co., Tokyo, Japan), MgO (high purity grade, Wako Pure Chemical Industries Ltd., Osaka, Japan), Y_2O_3 (99.9% pure, Shin-Etsu Chemical Co., Tokyo, Japan), Al_2O_3 (99.9% pure, Sumitomo Chemical Co., Tokyo, Japan), AlN (Grade F, Tokuyama Soda Co., Tokyo, Japan) 파우더를 혼합한 G1을 사용하였다. 각 샘플들은 에틸알콜 중에서 Si_3N_4 분을 첨가하여 24시간 혼합하였으며, 80℃의 건조기에서 8시간동안 건조시키고, 60메시체를 통과시켜 과립화 하였

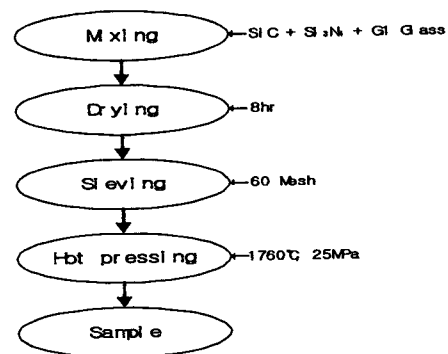


Fig. 1 Flow chart for ceramic tool

다. 각 샘플은 Table 1.에서 보이는 것처럼, β -SiC양과 압축시간을 변화 시켜 25Mpa하의 N₂분위기에서 소결하여 시편을 만든 후 SNGN 120416의 크기로 시편을 가공하여 완성하였다. 이번 연구에서 사용된 시험편은 Table 2.와 같은 조건으로 고온가압소결(HP) 및 질소가스 분위기에 서 제작된 세라믹으로써, Fig. 1과 같은 제조공정을 보인다.

절삭특성 비교시험에 사용된 공구는 세라믹 공구 중에 서 많이 사용되고 있는 상용 제품인 Si₃N₄ 공구와 (AS10 : Taegu Tec) 새로 개발 중인 SCN시리즈이다. SCN 시리 즈 중 SCN1-20, SCN2-20, SCN4-20, SCN8-20, SCN12-20, SCN16-20, SCN24-20은 조성은 같지만(β -SiC: 20wt%, α -Si₃N₄: 71wt%, β -Si₃N₄: 1wt%, G1: 8wt%) 소결 시간은 1~24시간으로 각각 다르다. 여기서 앞의 숫자는

Table 1. Listofcompositionandsinteringcondition

Sample	Batch (wt%)Sintering				Condition		
	β -SiC	α -Si ₃ N ₄	β -Si ₃ N ₄	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,

Table 2. Weight percentage of β -SiC and sintering time of SCN series for the experiment
(○ : executed experiments)

wt% of β -SiC	sintering time (hr)							
	1	2	4	8	12	16	24	
5				○				
10				○				
20	○	○	○	○	○	○	○	
25				○				
30				○				

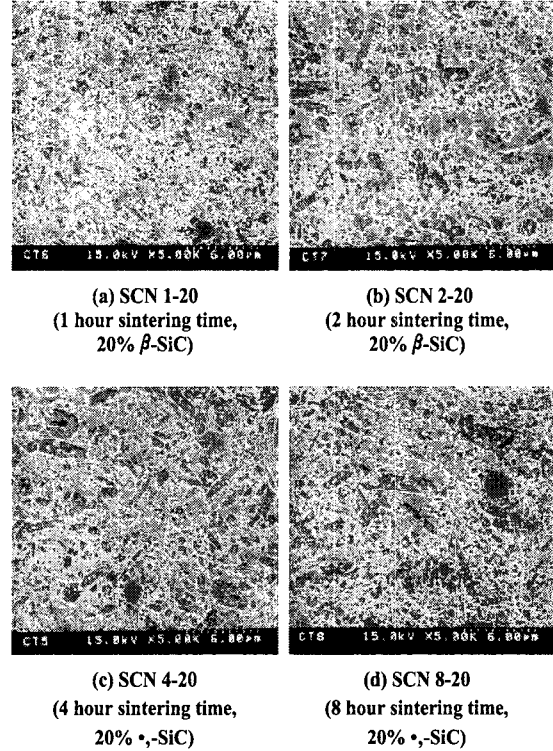


Fig. 2 S.E.M of microstructure of 20% β -SiC ceramics with different sintering time

소결시간(hour)을 나타내고뒤의 숫자는 β -SiC의 wt%를 나타낸다. SCN8-5, SCN8-10, SCN8-20, SCN8-25, SCN8-30은 소결시간은 8시간으로 동일 하지만, SiC의 양이 5~30wt%로 다르다. 대표적인 SCN 시리즈의 S.E.M 분석 사진을 Fig. 2에 나타 내었다. 사진에서 볼 수 있듯이 소결시간이 클수록 SiC의 결정립이 성장하여 결정립 크기가 커짐을 알 수 있으며, 이것은 파괴인성을 증가 시켜 대체적인 절삭 성능을 향상 시킴을 실험 결과를 통하여 확인 할 수 있다.

각 소결시편의 밀도는 아르키메데스 방법을 사용하여 측정하였다. 소결시편의 이론 밀도는 SiC(3.2178g/cm³), Al₂O₃(3.793g/cm³), Al₂O₃(4.840g/cm³), Si₃N₄(3.180g/cm³), MgO (3.560g/cm³) 및 AlN(3.251g/cm³)을 사용하여 혼합 법칙으로 구하였으며, 상대 밀도는 이론 밀도 와 측정 밀도의 백분율로 구하였다. 파괴인성은 소결시편을 절단한 후 경마 연마기를 사용하여 9, 6, 3, 1 mm의 다이아몬드 현탁액의 순서로 경 면 연마하고 비커스 경도계를 사용하여 입자 압입법에 의한 파괴인성을 측정하였다. 각 측정

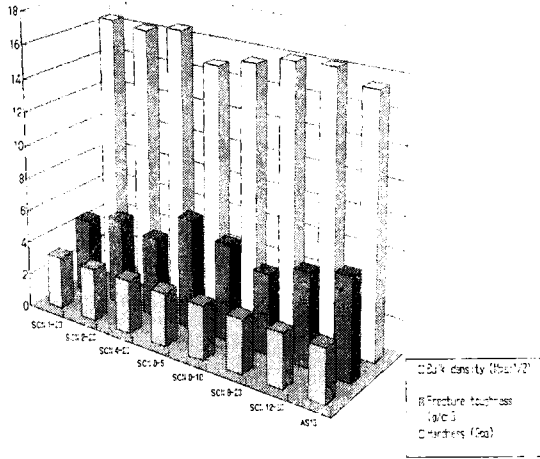


Fig. 3 Mechanical properties of ceramic cutting tool materials

값은 5회 이상 측정하여 평균값을 구하였으며 압입 하중은 98N, 압입 속도는 70mm/min, 유지시간은 15초의 조건으로 시험하였으며 KS 1603에 의하여 구하였다. 본 연구에 사용한 절삭공구의 주요 기계적 성질을 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 개발중인 세라믹 시편들은 상용 Si₃N₄ 공구에 비하여 유사하거나 약간 낮은 파괴 강도, 높은 경도와 영률을 가지고 있음을 알 수 있다.

절삭가공 실험에 사용한 공작기계는 일반선반이고 각 절삭공구의 형태는 SNGN 120416이며, 공구 홀더는 절입각이 45°인 CSDNN 2525M 12CEA Type을 사용하였다. 기준절삭조건을 선정하기 위하여 절삭깊이 0.25mm, 절삭속도 55m/min, 85m/min, 100m/min, 140m/min, 160m/min, 이송량 0.2mm/rev, 0.3mm/rev, 0.4mm/rev, 0.5mm/rev의 조건에서 상용 Si₃N₄ 공구를 이용하여 열처리한 고경도 SCM 440 (AISI4140, HRC : 58)을 절삭하였으며, 공구 교환시간을 고려한 시간당 최대 절삭거리를 보인 조건에서 SCN시리즈로 절삭 실험을 하였다.⁽⁷⁾

또한, 열처리한 SCM 440보다 경도가 낮은 회주철(Gray cast iron, 180~250HB)을 상용 Si₃N₄ 공구의 추천 절삭속도 중의 하나인 절삭속도 330m/min와 이송량 0.2mm/rev, 절삭깊이 0.5mm의 조건에서도 절삭특성 비교실험을 행하였다. 모든 절삭 실험은 건식 절삭으로 실험 하였으며, 절삭 실험동안 Kistler사의 9257B 공구동력계를 이용하여 절삭력을 측정한 후 HS-DAS 12 보드를 통해 A/D변환을 거쳐 586PC에 저장하였다. 공구 현미경을 이용하여 공구의 플랭크면 평균 마멸량을 측정하고, 플랭크면 마멸량이

300mm이 되었을 때까지의 시간을 공구수명시간으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

기준절삭조건을 선정하기 위하여, 상용제품인 Si₃N₄ 공구(AS10 : Taegu Tec)의 절삭 실험을 행한 결과, 절삭속도 160m/min, 이송량 0.2mm/rev, 절삭깊이 0.25mm의 조건으로 실험조건이 결정되었다.⁽⁷⁾

Fig. 4는 소결시간이 절삭공구의 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 SiC의 양을 20wt%로 고정하고 소결시간을 1~24시간까지 다르게 소결한 SCN시리즈와 상용 Si₃N₄세라믹 공구의 절삭특성 비교실험 결과이다.

그림에서 보이는 것처럼 상대적으로 소결시간이 짧은 SCN1과 SCN2는 초기부터 급격히 마멸이 진행되어 정상적인 절삭가공이 어려운 것을 알 수 있으며, 상대적으로 소결시간이 긴 SCN4, SCN8은 초기에 상용 Si₃N₄세라믹 공구와 유사한 내마멸성을 나타내지만, 절삭 20초 이후로 SCN8 보다 소결시간이 짧은 SCN4가 급격히 마멸이 된다. 비교적 높은 강도를 가진 SCN 시리즈 중에서 경도와 파괴 인성이 높은 SCN8-20의 수명이 긴 것으로 나타났고, 소결시간이 8시간 이상이 되면, 공구 수명은 다시 줄어들었다.

위의 실험을 바탕으로 β-SiC가 공구특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 소결시간을 8시간으로 고정하고 β-SiC의 양을 5~30wt%로 변화시켜 가면서 제작한 SCN 시리즈 공구와 상용Si₃N₄세라믹 공구의 절삭특성을 비교

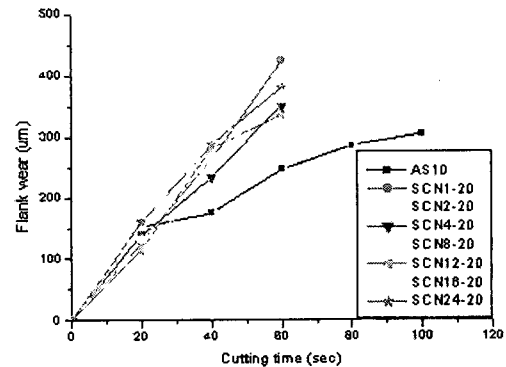


Fig. 4 Flank wear curve of different sintering time SCN-series during machining heat treated SCM440 with 160m/min cutting speed, 0.2mm/rev. feed rate and 0.25mm depth of cut

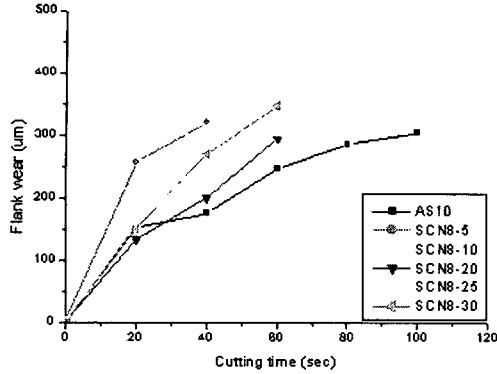


Fig. 5 Flank wear curve of different SiC content SCN-series during machining heat treated SCM440 with 160m/min cutting speed, 0.2mm/rev. feed rate and 0.25mm depth of cut

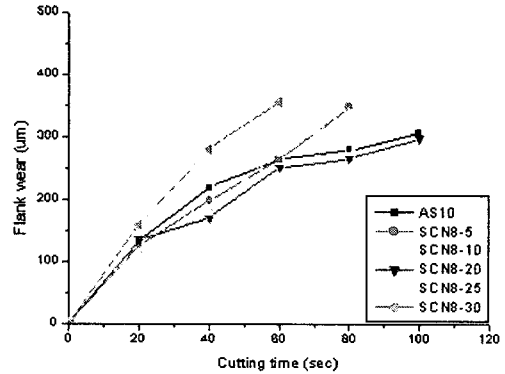


Fig. 6 Flank wear curve of different SiC content SCN-series during machining gray cast iron with 330m/min cutting speed, 0.2mm/rev. feed rate and 0.5mm depth of cut

한 결과가 Fig. 5에 주어졌다. 상대적으로 SiC양이 적은 SCN8-5의 경우 초기부터 급격히 마멸이 진행되어, 절삭 후 25초 이내에 플랭크면 마멸량이 300µm를 넘었지만, SiC의 양이 늘어날 수록 공구수명이 길어졌고, SCN8-20의 경우에, 상용 Si_3N_4 세라믹 공구에 거의 근접하는 최대의 공구수명 시간을 얻을 수 있었다. 하지만, SiC양이 25wt% 이상 늘어나면, 공구의 수명시간은 다시 줄어들었다. Fig. 6에서는 열처리한 SCM 440보다 경도가 낮은 회주철(180~250HB)을 공작물로 사용하여, 상용 Si_3N_4 세라믹 공구의 추천절삭조건 (절삭속도: 300~500m/min, 절삭깊이: 0.3~0.8mm)중의 하나인 절삭속도 330m/min, 이송량 0.2mm/rev, 절삭깊이 0.5mm의 조건 하에서 소결시간을 8시간으로 고정하고, SiC의 양을 5~30wt%로 만든 SCN 시리즈 공구와 공구수명을 비교하였다. 열처리한 SCM 440의 경우와 마찬가지로 SiC첨가량이 20wt%일 때 최대의 공구 수명을 얻었다.

Fig. 7은 첨가한 SiC양을 20wt%로 하고, 소결시간을 1~24시간으로 한 SCN 시리즈 공구의 공구수명을 나타내었다. 소결시간이 늘어날 수록 공구수명이 길어지고, 소결시간이 12시간인 SCN12-20 공구에서 최대의 공구 수명을 얻을 수 있었으며, 상용 Si_3N_4 세라믹 공구보다 우수함을 알 수 있었다.

Fig. 8과 9는 공작물로 열처리된 SCM440을 사용하였을 때 SiC 첨가량과 소결시간에 대한 공구 수명 막대그래프이다. 이 그래프에서 SCN8-20이 가장 긴 공구 수명을 보임을 알 수 있다.

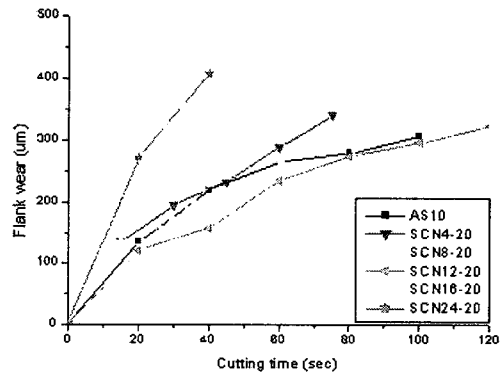


Fig. 7 Flank wear curve of different sintering time SCN-series during machining gray cast iron with 330m/min cutting speed, 0.2mm/rev., feed rate and 0.5mm depth of cut

Fig. 10과 11은 공작물로 회주철을 사용하였을 때의 SiC첨가량과 소결시간에 대한 막대그래프이며, SCN8-20과 SCN12-20이 가장 긴 공구 수명을 보임을 알 수 있다. 절삭특성 비교실험중 측정된 절삭력에서는 공통적으로 배분력이 가장 크게 나타났다. 이는 세라믹 공구의 공구 각이 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. Fig 12는 SCN 시리즈 중에서 SCN8-30의 공작물에 따른 플랭크와 경사면의 마멸 형태를 보여주는 그림이다. 약 20초 동안의 절삭 후에 공구 현미경을 통하

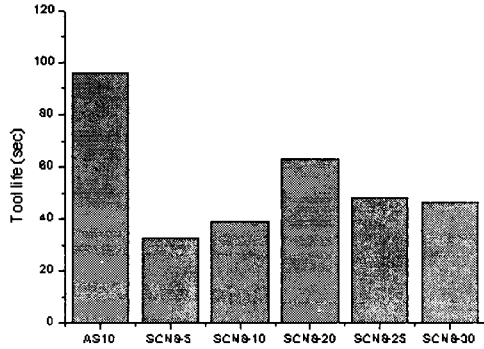


Fig. 8. Tool life of ceramic inserts with different SiC composition during machining heat treated SCM440 (cutting speed:160m/min, feedrate: 0.2mm/rev, depth of cut: 0.25mm)

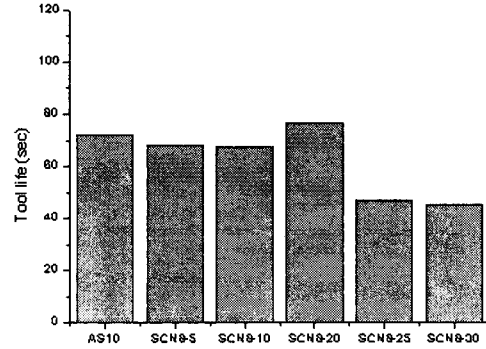


Fig. 10 Tool life of ceramic inserts with different sintering time during machining gray cast iron (cutting speed: 330m/min, feedrate: 0.2mm/rev, depth of cut: 0.5mm)

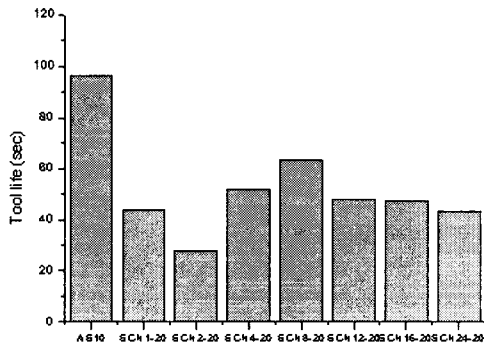


Fig. 9. Tool life of ceramic insert with different sintering time during machining heat treated SCM440 (cutting speed: 160m/min, feedrate: 0.2mm/rev, depth of cut: 0.25mm)

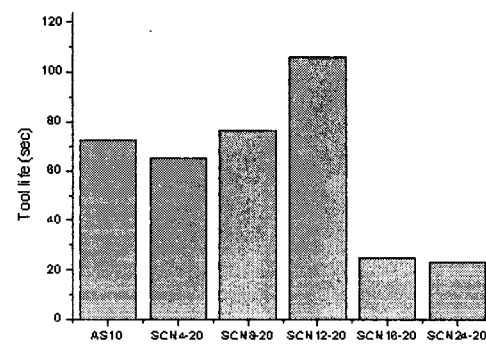


Fig. 11. Tool life of ceramic insert with different sintering time during machining gray cast iron (cutting speed: 330m/min, feedrate: 0.2mm/rev, depth of cut: 0.5mm)

여 저장된 그림으로써 플랭크 평균마멸량이 약 150mm 정도이다.

4. 결론

상용Si₃N₄공구와 SiC-Si₃N₄계 세라믹 공구를 열처리한 SCM 440과 회주철을 공작물로 하여 절삭특성을 비교, 검토하기 위하여 SCN시리즈를 제조하여 기계적 성질을 평가하였고, 선삭 가공에 있어서 절삭 조건별로 각 공구의 절삭특성에 대하여 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 소결시간의 변화와 SiC첨가량에 따른 SiC- Si₃N₄계 세라믹 공구의 기계적 특성과 공구수명에 미치는 영향을 알 수 있었다.
- (2) 소결시간과 SiC첨가량이 다른 SCN 시리즈의 공구 수명 실험결과, 소결시간이 8시간이고 SiC첨가량이 20wt%인 SCN8-20이 SCM440을 절삭할 때 가장 공구수명이 길었다.
- (3) 회주철을 절삭할 경우, SiC첨가량이 20wt%이고, 소결시간이 12시간인 SCN12-20이 상용 Si₃N₄세라믹 공구보다우수한 결과를 보였다.

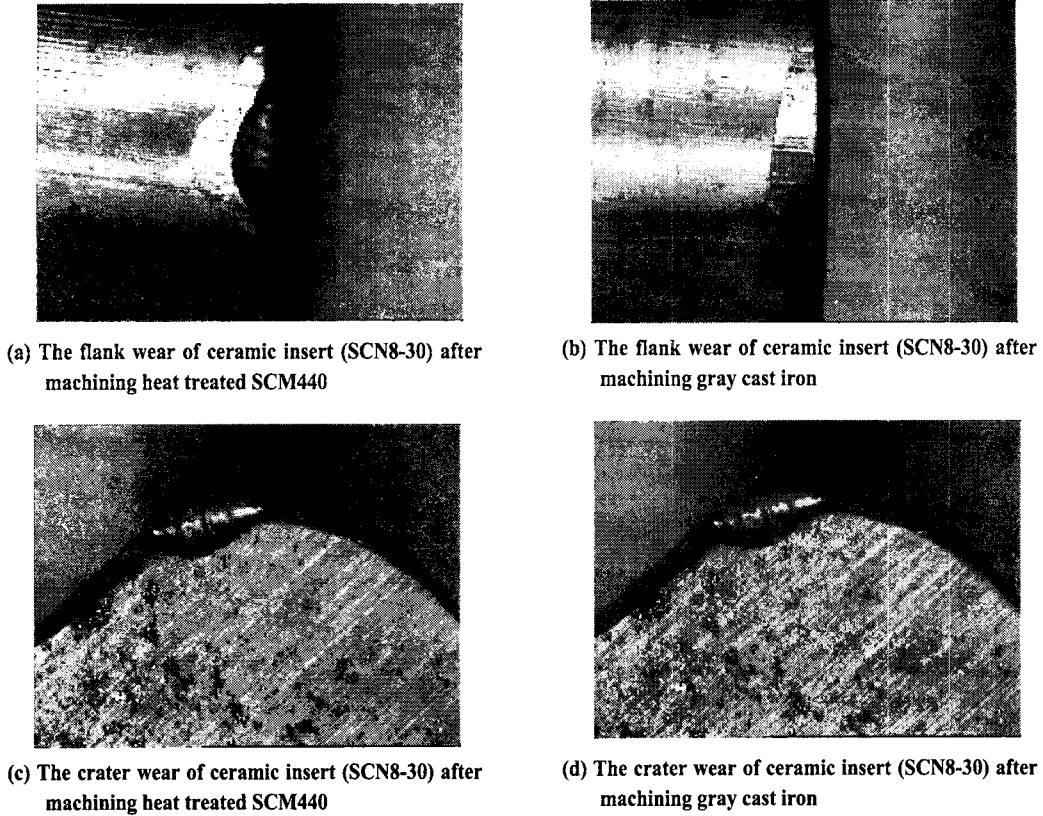


Fig. 12 The photography of tool wear after machining

감사의 글

이 논문은 2001년도 한국과학재단의 목적기초 연구비에 의하여 지원되었음 (R01-2001-00255).

참고 문헌

- (1) S. Kayosi, "난삭재의 절삭가공 기술", pp.31-49, Japan, 1989.
- (2) ELIZABETH R., etc. "Machining with Al_2O_3 -SiC-Whisker Cutting Tools," Ceramic Bulletin, Vol. 67, No. 6, pp.1016-1019, 1988.
- (3) 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.
- (4) Deng jianxin, Ai xing, "Wear resistance of Al_2O_3/TiB_2 ceramic cutting tools in sliding wear tests and in machining process.", journal of materials processing technology, July, 1996.
- (5) David Bordui, "Hard Part Machining with Ceramic Inserts," Ceramic Bulletin Vol. 67, No. 6, pp.998-1001, 1988.
- (6) Steven F. Wayne 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.
- (7) 박준석, 김경재, 이성구, 권원태, 김영욱, "SiC-Si₃N₄ 세라믹공구의 소결시간과 조성변화가절삭특성에 미치는 영향", 한국공작기계학회, 춘계학술대회 논문집, pp.321-326, 2001.