

Si₃N₄계 세라믹 절삭공구의 절삭특성 평가 (Cutting Characteristic of Si₃N₄ based Ceramic Inserts)

안영진, 고영목(서울시립대원), 권원태(서울시립대 기계정보공학과), 김영욱(서울시립대 재료공학과)

Y. J. Ahn, Y. M. Ko, W. T. Kwon, Y-W. Kim

University of seoul, Chun-nong-dong 90, Seoul, Korea

Abstract

This study is performed to develop the Si₃N₄ based ceramic inserts. Si₃N₄ with addition of SiC and Al₂O₃ is investigated to determine the possibility to be a new tool. The tool life of Si₃N₄ insert with more than 20wt% SiC is shorter than commercial Si₃N₄ insert during machining both heat treated SCM440 and gray cast iron. Even though SiC has higher hardness than Si₃N₄, its chemical affinity to the iron on high temperature may causes deterioration of tool life. To the contrary, Si₃N₄ insert with Al₂O₃ shows increase of tool life up to 300% compared to the commercial Si₃N₄ insert. It may attribute to the high temperature stability of Al₂O₃. Further study will be focused on the optimization of ceramic inserts with the composition of Si₃N₄ and Al₂O₃.

1. 서 론

일반적으로 세라믹공구는 높은 내마모성과 고온경도, 화학적 안정성 등의 특성을 가지고 있어 적은 절삭깊이와 이송량을 주어 고속절삭에 주로 사용된다. 반면 세라믹 공구는 초경공구에 비해 낮은 인성과 열충격 저항성을 가지고 있어 공구의 파손이 잘 발생한다. 공구의 파손을 줄이기 위해서 세라믹공구가 갖추어야 할 성질은 인성과 열충격 저항성이며, 또한 마모 방지를 위해 갖추어야 할 성질로서는 높은 내마모성과 고온경도, 화학적 안정성이다. 세라믹공구의 단점인 파괴저

항을 증가시키기 위해 많은 연구가 진행중이며, 인성증가를 위해 Al₂O₃에 다른 성질을 갖는 세라믹들을 섞거나 고용체를 만드는 방법이 소개되었다. 높은 경도, 부식저항성, 열안정성이 뛰어난 알루미늄의 경우, 경도와 휩파괴강도를 동시에 증가시키는 방법으로 Submicron grain size와 Porosity를 줄이는 방법이 소개되었다.[1] 특히 알루미늄은 열전도율이 낮고 고온경도가 높아 공작물의 고속절삭에 주로 사용되고있다. 또한, 경도는 Al₂O₃보다 떨어지나 적은 영률과 열팽창률, 공유결합으로 높은 파괴인성의 특성을 갖는 Si₃N₄에 Si 대신 N, N 대신 O를 치환시켜 인성을 더욱 증가시킨 SiAlON도 개발되었다.[2]

Si₃N₄와 같이 열 팽창이 적은 물질에 경도가 크고 열팽창계수가 높은 TiC를 섞으므로써 서로 다른 열팽창율로 내부응력을 발생시켜 파괴인성을 증가시키는 방법도 개발되었다.[1, 3, 4] 특히 인성을 높인 SiC-whiskered공구는 낮은 열팽창계수와 높은 열전도율을 갖는 SiC를 털모양의 형태로 섞어서 소결한 것으로 Ni계 합금인 Inconel 718을 절삭하는데 가장 많이 사용된다.[3]

또 다른 단점으로 세라믹공구는 낮은 열충격 저항성을 가지고 있어 절삭력에 의한 파괴보다는 열 충격에 의한 파괴가 더 많이 발생한다. 열충

격저항은 $\frac{\sigma a}{a E}$ (σ : 열전도율, a : 파괴인성,

a : 열팽창률, E : 영률), 세라믹의 경우 초경공구에 비해 열전도율과 파괴인성은 낮고 열팽창률과 영률은 크기 때문에 열충격저항이 낮게 나타난다.[5] 열충격저항을 늘리기 위해 Al₂O₃에 높은 열전도율과 낮은 열팽창률을 갖는 SiC를 기본적으로 낮은 열전도율을 갖는 Si₃N₄를 모재로 사용하는 세라믹 공구를 만드는 방법[4]이 있으나 SiC, Si₃N₄는 둘다 Fe와 반응하는 성질이 있어

화학적 안정성은 떨어진다.[5]

이 논문에서는 세라믹 공구 중, 고속가공과 경도가 높은 공작물의 가공에 적절한 성능을 보이는 Si_3N_4 계 상용 세라믹 공구와 기존에 개발한 $\text{SiC-Si}_3\text{N}_4$ 계 세라믹 공구, 새롭게 개발한 알루미늄이 첨가된 Si_3N_4 계 세라믹 공구의 절삭 성능을 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

절삭특성 비교시험에 사용된 시편의 분말로서 β -SiC 분말 (Betarundum, Ultrafine grade, Ibiden, Tokyo, Japan)는 평균 입경 $0.28 \mu\text{m}$, 순도 99%이상이었으며, α - Si_3N_4 분말 (Grade E 10, Ube Industries, Tokyo, Japan)와 β - Si_3N_4 분말 (Grade SN-P21FC, Denki Kagaku, Tokyo, Japan), 소결첨가제로 SiO_2 (reagent grade, Kanto Chemical Co., Tokyo, Japan), Y_2O_3 (high purity grade, Wako Pure Chemical Industries Ltd., Osaka, Japan), MgO (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) 분말을 혼합한 G1을 사용하였다. 각 분말들은 메틸알콜 중에서 Si_3N_4 Ball을 첨가하여 24시간 혼합하였으며, 80°C 의 건조 오븐에서 8시간 동안 건조시키고, 60mesh체를 통과시켜 과립화하였다. 각 시편에 따라서 Table 1.에서 보이는 것처럼, SiC-Series는 β -SiC 양과 압축 소결 시간을 변화시켜, SN-Series는 α - Si_3N_4 : 91wt%, β - Si_3N_4 : 1wt%로 압축 소결 시간만 변화시켜 25Mpa하의 N_2 분위기에서 소결하여 시편을 만든 후 SNGN 120416의 크기로 시편을 가공하여 완성하였다.

절삭특성 비교시험에 사용된 공구로는 세라믹 공구중에서 많이 사용되고 있는 상용 제품인 Si_3N_4 공구(AS10 : Taegu Tec)와 기존에 개발한 SCN-Series, 새롭게 개발한 SN-Series 이다. SCN-series중 SCN8-20, SCN8-25, SCN8-30은 8시간으로 소결 시간은 같지만 β -SiC가 20wt% ~ 30wt%로 각각 다르다. SCN16-20, SCN24-20은 조성(β -SiC : 20wt%, α - Si_3N_4 : 71wt%, β - Si_3N_4 : 1wt%, G1 : 8wt%)은 같지만 소결 시간

Table 1. List of Composition and Sintering Condition

Sample	Batch(wt%)				Sintering Condition		
	β -SiC	α - Si_3N_4	β - Si_3N_4	G1	Temperature	Time	Pressure
SCN8-20	20	71	1	8	1760°C	8hr	25MPa
SCN8-25	25	66.06	0.94	8	1760°C	8hr	25MPa
SCN8-30	30	61.13	0.87	8	1760°C	8hr	25MPa
SCN16-20	20	71	1	8	1760°C	16hr	25MPa
SCN24-20	20	71	1	8	1760°C	24hr	25MPa
	α - Si_3N_4	β - Si_3N_4	G1				
SN1	91	1	8		1760°C	1hr	25MPa
SN2	91	1	8		1760°C	2hr	25MPa
SN8	91	1	8		1760°C	8hr	25MPa

이 16시간과 20시간으로 각각 다르다. 새롭게 개발한 SN-Series는 조성(α - Si_3N_4 : 91wt%, β - Si_3N_4 : 1wt%, G1 : 8wt%)은 같지만 소결 시간이 1시간, 2시간, 8시간으로 각각 다르다.

절삭가공 실험에 사용한 공작기계는 범용 선반이며, 각 절삭공구의 기학적 형태는 SNGN 120416이고, 툴 홀더는 절입각이 45° 인 CSDNN 2525M 12CEA Type을 사용하였다.

Table 2. Surface roughness of Ceramic tools

단위 : μm

Sample	Rake			Flank		
	Ra	Rmax	Rz	Ra	Rmax	Rz
Si_3N_4	0.16	2.11	1.65	0.12	1.11	0.80
SCN8-20	0.01	0.27	0.22	0.01	0.64	0.25
SCN8-25	0.02	1.03	0.59	0.02	0.69	0.43
SCN8-30	0.10	1.13	0.86	0.15	0.68	0.57
SCN16-20	0.12	2.79	1.69	0.06	0.65	0.57
SCN24-20	0.11	2.18	1.16	0.03	0.61	0.62
SN1	0.01	0.27	0.22	0.01	0.57	0.25
SN2	0.11	0.81	0.78	0.02	0.77	0.34
SN8	0.05	0.82	0.62	0.02	0.68	0.43

기준 절삭조건은 고경도 SCM 440(AISI4140, HB=285~352)의 경우 절삭속도 $V=160\text{m/min}$, 이송량 $f=0.2\text{mm/rev}$, 절삭깊이 $d=0.25\text{mm}$ 로 절삭하였다. 또한, 열처리한 SCM440보다 경도가 낮은 회주철(Gray Cast Iron, 180~250HB)을 상용 insert의 추천 절삭속도 ($300\sim500\text{m/min}$)중의 하

나인 절삭속도 $v=330\text{m/min}$ 와 이송량 $f=0.2\text{mm/rev}$, 절삭깊이 $d=0.5\text{mm}$ 의 조건에서 절삭특성을 비교 실험하였다. 모든 절삭 실험은 건식 절삭으로 실험하였으며, 공구 현미경을 이용하여 공구의 플랭크면 평균 마모량을 측정하고, 플랭크면 마모량이 $300\ \mu\text{m}$ 이 되었을 때까지의 시간을 공구 수명으로 하여 상용공구인 AS10과 비교 실험을 하였다.

Table 3. Chemical compositions & Mechanical property of heat treated SCM440 and Gray Cast Iron.

Div.	Chemical composition (wt%)								Mechanical Property
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Others			Hardness
SCM440	0.83	0.15	0.60	0.90	0.15	0.03			HB 285-352 HRC 58
	-	-	-	-	-				
	0.43	1.35	0.90	1.20	0.3				
Div.	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	S	Hardness
Gray Cast Iron	3.25	0.05	0.15	0.5	0.05	0.05	Max 0.12	Max 0.15	HB 180-250 HRC 20
Iron	3.5	0.45	0.4	0.9	0.1	0.2			

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에 사용한 절삭공구의 화학적 조성 과 소결 조건은 Table 1.에, 각 시편의 표면조도를 측정하여 Table 2.에 나타내었다. 준비된 각 세라믹 시편들은 Si_3N_4 인서트와 비교하여 유사하거나 약간 높은 경도를 가지고 있었고 Table 3.은 본 연구에 사용된 공작물로 세라믹의 절삭특성을 알아보기 위해 열처리된 고경도강인 SCM440 (HB 285-352)와 저경도인 회주철(Gray Cast Iron HB 180-250)의 화학적 조성 과 경도를 나타내었다.

Fig 1.은 열처리된 SCM440을 절삭속도 $V=160\text{m/min}$, 이송량 $f=0.2\text{mm/rev}$, 절삭깊이 $d=0.25$ 로 선삭 실험을 한 결과로, 매 15초마다 공구현미경을 통해 플랭크 마모를 측정 한 값들을 그래프로 나타내었다. Fig 1.에서 알 수 있듯이 모든 세라믹 insert들이 초기 15초까지는 급격한 플랭크 마모가 나타났고 SCN-Series는 이번 실험의 비교 대상인 AS10 (Si_3N_4 계 insert)보다 더 빠른 플랭크면의 마모를 나타내었다.

대부분 SiC-Series는 60초 이내에 플랭크면

마멸량이 $300\ \mu\text{m}$ 를 넘었고 SCN16-20 ($\beta\text{-SiC} : 20\text{wt}\%$, $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4 : 71\text{wt}\%$, $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4 : 1\text{wt}\%$, G1 : $8\text{wt}\%$, 소결시간 16시간)이 SCN-Series 중에서는 가장 좋은 결과를 나타내었다.

상용공구 AS10과 새롭게 개발한 SN-Series와의 비교 실험에서는 대부분의 SN-Series가 비슷한 플랭크면 마모를 나타내었고, SN-Series중에서 소결 시간이 2시간인 SN2 ($\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4 : 91\text{wt}\%$, $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4 : 1\text{wt}\%$, G1 : $8\text{wt}\%$)는 $300\ \mu\text{m}$ 까지의 마모를 측정에서 상용공구인 AS10보다 적은 플랭크면 마모를 나타내었다.

SCM440의 절삭실험 결과를 공구수명인 $300\ \mu\text{m}$ 까지 측정 한 후, 실험에 사용된 세라믹 인서트들을 공구 수명 그래프로 나타내었다. 결과적으로 인성을 증가시킨 SiC-Series는 Si_3N_4 계 인서트들에 비해 급격한 마모가 진행되어 SCM440의 정상적인 절삭가공이 어려운 것을 알 수 있었다. Si_3N_4 계 상용공구인 AS10과 새롭게 개발한 SN-Series와의 비교 실험에서는 AS10과 비슷한 마모율을 나타내었다. SN2의 경우 SCM440의 선삭 마모실험에서 더 좋은 공구 수명을 가짐을 알 수 있었다.

회주철의 선삭 비교 실험에서는 $V=330\text{m/min}$, 이송량 $f=0.2\text{mm/rev}$, 절삭깊이 $d=0.5\text{mm}$ 로 선삭 실험하고, 매 20초마다 공구현미경을 통해 $300\ \mu\text{m}$ 까지 플랭크면 마모를 측정하였다. Fig 2.에서 볼 수 있듯이 대부분 SiC-Series는 초기 20초 사이에 급격한 플랭크면 마모가 일어났고, SiC-Series 중 SCN8-20 ($\beta\text{-SiC} : 20\text{wt}\%$, $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4 : 71\text{wt}\%$, $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4 : 1\text{wt}\%$, G1 : $8\text{wt}\%$, 소결시간 8시간)만이 비교대상인 AS10(Si_3N_4 계)과 비슷한 플랭크면 마모를 나타내었다. 새롭게 개발한 Si_3N_4 계 SN-Series ($\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4 : 91\text{wt}\%$, $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4 : 1\text{wt}\%$, G1 : $8\text{wt}\%$)와 AS10과의 비교 절삭 실험에서는 SN-Series가 2~3배정도 우수한 절삭 성능을 보임을 알 수 있었다. 20초까지의 초기 마모구간에서 SN-Series는 SiC-Series나 AS10보다 적은 플랭크면 마모를 나타내었고, SN-Series는 공구수명 그래프에서 볼 수 있듯이 $300\ \mu\text{m}$ 까지의 마모가 점진적으로 증가함을 알 수 있다.

공구와 공구수명 관계 그래프 Fig 4.에서 Si_3N_4 계 상용공구인 AS10과 SN-Series를 비교했을 때 특히 SN2 ($\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4 : 91\text{wt}\%$, $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4 :$

1wt%, G1 : 8wt%소결시간 2시간)는 AS10에 비해 공구 수명이 3배정도 증가하였고, SN-Series 중 가장 우수한 절삭성능을 보였다.

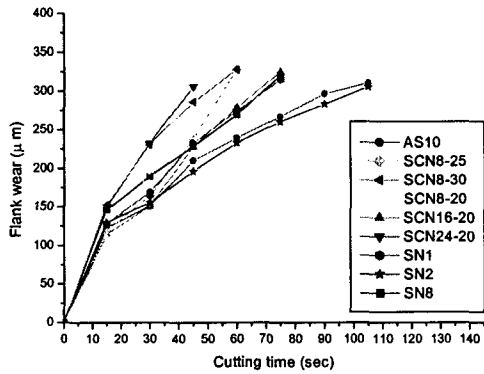


Fig. 1 Flank wear curves of and insert during machining heat treated SCM440 under $V=160\text{m/min}$ cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut.

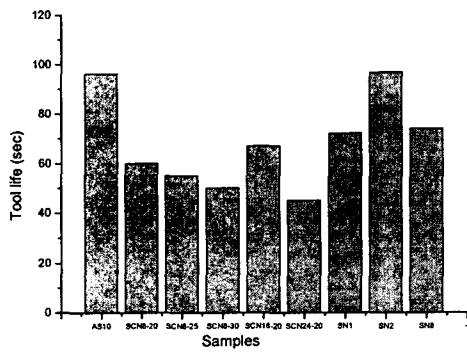


Fig. 2 Tool life of and inserts during machining heat treated SCM440 under $V=160\text{m/min}$ cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut.

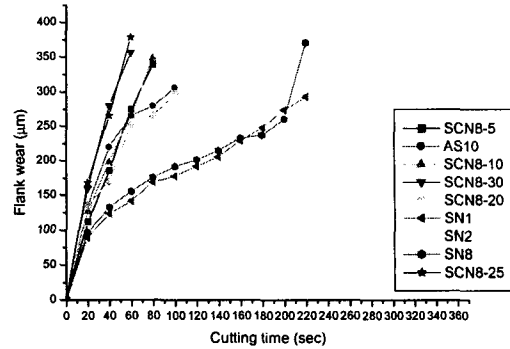


Fig. 3 Flank wear curves of and insert during machining Gray Cast Iron under $V=160\text{m/min}$ cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut.

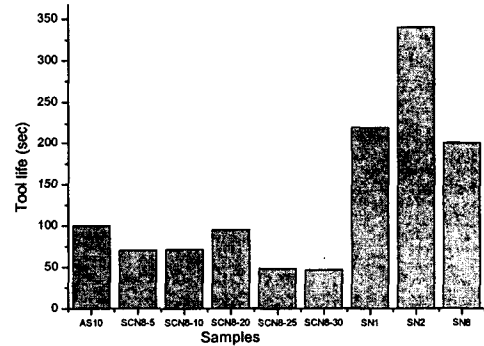
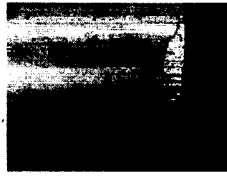
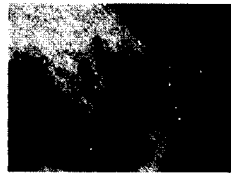


Fig. 4 Tool life of and inserts during machining heat treated Gray Cast Iron under $V=160\text{m/min}$ cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut

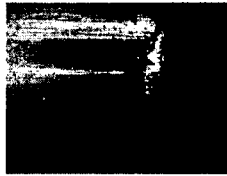


Flank wear

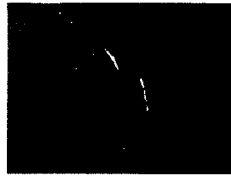


Crater wear

Fig 5. Photographs of SN2 ceramic tool after machining of SCM440 V=160m/min, f=0.2 mm/rev, d=0.5mm



Flank wear



Crater wear

Fig 6. Photographs of SN2 ceramic tool after machining of Gray Cast Iron V=160m/min, f=0.2mm/rev, d=0.5mm

4. 결 론

Si₃N₄계 상용공구인 AS10과 SiC-Si₃N₄계 세라믹 공구, 새롭게 개발한 알루미늄이 첨가된 Si₃N₄계 SN-Series공구의 SCM440과 Gray Cast Iron을 공작물로 하여 조성에 따른 절삭특성을 비교 검토하였고, 마모가 300 μm가 될 때까지의 Tool life를 예측하였다.

1) 열처리한 SCM440의 건식 절삭 비교 실험에서 Si₃N₄계 상용공구인 AS10과 새롭게 개발한 Si₃N₄계 SN-Series의 마모특성 비교실험에서 SN-Series의 SN2가 비슷한 마모특성과 공구 수명을 나타내었다.

2) 회주철(Gray Cast Iron)의 건식 절삭 실험에서는 SN-Series가 전체적으로 AS10 보다 2배 이상의 좋은 마모특성을 보였으며, 특히 SN2는 3배 정도의 공구수명 증가와 우수한 마모특성을 나타내었다.

후 기

본 논문은 2001년도 한국과학재단 특정기초연구비로 지원된 연구결과입니다. (R01-2001-00255)

참고문헌

- [1] 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
- [2] M. Szafran, E. Boyryk, D. Kukra, A. Olszyna, "Si₃N₄-Al₂O₃-TiC-Y₂O₃ composites intended for the edges of cutting tools," Ceramics International 26, pp.579-582, 2000
- [3] ELIZABETH R., etc. "Machining with Al₂O₃-SiC-Whisker Cutting Tools," Ceram. Bulletin, Vol. 67, No. 6, pp.1016-1019, 1988
- [4] David Bordui, "Hard Part Machining with Ceramic Inserts," Ceramic Bulletin Vol. 67, No. 6, pp.998-1001, 1988
- [5] 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
- [6] E. Dow Whitney, Pallavoor N. Vaidyanathan, "Microstructural Engineering of Ceramic Cutting Tools," Ceram. Bulletin, Vol. 67, No. 6, pp.1010-1014, 1988
- [7] Bas Kerkwijk, Jaco J.C. Buizert and Henk Verweij, "Tribological Tests Verify Wear Resistance," The American Ceramic Society Bulletin, pp.49-53, Jan. 2000