

Si₃N₄계 세라믹 절삭공구의 절삭성능평가 및 회귀분석에 의한 공구수명 추정

안영진*, 고영목⁺, 권원태⁺⁺ (서울시립대 기계정보공학과), 김영욱⁺⁺⁺ (서울시립대 신소재공학과)

Cutting Performance Evaluation and Estimation of Tool Life by Simple & Multiple Linear Regression Analysis of Si₃N₄ Ceramic Cutting Tools.

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

Abstract

Four kinds of Si₃N₄-based ceramic cutting tools with different sintering time were fabricated to investigate the effect of sintering time on the microstructure, mechanical properties, grain sizes and the cutting performance. An endeavor was also made to determine the relation among mechanical property, grain size and tool life. Si₃N₄ home made cutting tool sintered for 1 hour under 1760° temperature and 25MPa pressure showed the best cutting performance among selected ceramic tools during machining both gray cast iron and heat treated SCM440. Multiple linear regression model was used to estimate the tool life from mechanical property, grain size and showed good result. It was also shown that hardness imposed the biggest effect on tool life.

Key Words : Si₃N₄ ceramic tool (Si₃N₄ 세라믹 공구), Tool life (공구 수명), Flank wear (플랭크 마모), Grain size (결정립크기), Mechanical properties (기계적 성질), Linear regression analysis (선형회귀 분석)

1. 서론

일반적으로 세라믹 절삭공구는 높은 내마모성과 고온경도, 화학적 안정성 등의 우수한 특성을 가지고 있어 고경도 재료의 절삭 및 주철의 고속가공에 주로 사용되고 있다. 반면 낮은 인성과 열충격 저항성을 가지고 있어 공구의 파손이 잘 발생한다. 이러한 세라믹 절삭공구의 단점인 파괴

저항성을 증가시키기 위해 많은 연구가 진행 중이며, 인성 증가를 위해 Al₂O₃와 Si₃N₄를 모재로 하여 다른 성질을 갖는 세라믹들을 섞거나 고용체를 만드는 방법이 소개되었다. Al₂O₃계 세라믹 절삭공구의 경우 경도와 휨강도를 동시에 증가시키는 방법으로 결정립크기 (grain size)와 기공율 (porosity)를 줄이는 방법이 연구되었다.^(1, 2) 또 다른 단점으로 Al₂O₃계 세라믹 절삭공구는 낮은 열충격 저항성을

* 안영진, 서울시립대학교 기계정보공학과 (peppermint@sidae.uos.ac.kr)
주소: 130-743 서울시 동대문구 전농동 90
+ 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원
++ 서울시립대학교 기계정보공학과
+++ 서울시립대학교 신소재공학과

가지고 있어 절삭력에 의한 파괴뿐만 아니라 열충격에 의한 파괴도 자주 발생한다.⁽³⁾ 이러한 열충격 저항성을 높이기 위해 Al_2O_3 에 높은 열전도율과 낮은 열팽창률을 가진 SiC를 첨가하여 소결하는 방법이 소개되었다.^(4, 5)

최근 많이 사용되고 있는 Si_3N_4 계 세라믹 절삭공구는 Al_2O_3 계 세라믹 절삭공구에 비해 파괴인성과 강도가 높고 열팽창률이 낮아 내열충격성이 우수하다. 반면 Al_2O_3 계 세라믹 절삭공구보다 경도가 낮아 내마모성이 떨어지는 단점 때문에 고경도강의 절삭 보다는 주철의 고속가공에 주로 사용되고 있으며, 특히 열충격 저항성이 좋아 타 세라믹 공구와는 달리 가공 시 절삭유 사용이 가능하다.

일반적으로 Si_3N_4 계 세라믹 절삭공구의 경우 소결이 어렵기 때문에 소결을 촉진하기 위한 소결촉진제 (sintering additive)에 관한 많은 연구가 진행되어지고 있다.⁽⁶⁾ 이러한 소결 촉진제의 종류와 양에 따라 Si_3N_4 계와 SIALON계로 분류되어진다. 일반적으로 Si_3N_4 계 세라믹 절삭공구는 소량의 Aluminium과 oxygen을 소결 첨가제로 하여 소결한 것을 말하며, 바늘과 같은 결정립 성장을 통해 강도와 마찰 마모에 대한 저항성을 향상시킨 재종이다. SIALON계 세라믹 절삭공구는 Si_3N_4 의 Si 대신에 Al이, N 대신 O가 부분적으로 치환된 고용체로서 비교적 상압소결이 가능하다.⁽⁷⁾ 또한 SIALON은 Si_3N_4 입자에 aluminum과 oxygen이 고용되어 있어, 특히 부식 마모와 산화 마모 저항성이 우수하여 Inconel 등의 절삭에도 우수한 성능을 나타낸다.

또한 세라믹 절삭공구의 공구수명과 밀접한 관계가 있는 기계적 특성과 미세구조 등에 따른 공구수명에 대한 연구도 진행 되어 졌다. 특히, 경도와 파괴인성이 공구수명에 밀접한 관계가 있음이 밝혀졌으며, 밀도, 소결입자 크기 등이 공구수명에 미치는 영향에 대해서도 소개되었다.^(1, 2, 8)

본 연구에서는 세라믹 절삭공구 중 높은 인성과 열충격 저항성을 가지고 있어 주철의 고속가공과 황삭, 중삭에도 뛰어난 성능을 발휘하는 사용 Si_3N_4 계 세라믹 절삭공구와 새롭게 개발한 Si_3N_4 계 세라믹 절삭공구의 절삭 성능과 비교하고 기계적 특성과 미세구조가 공구 수명에 미치는 영향에 대해 회귀분석법을 이용하여 추정하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 Si_3N_4 계 세라믹 절삭공구의 제조

절삭특성 비교시험에 사용된 시편의 출발원료로 $\alpha - Si_3N_4$ 분말 (Grade E 10, Ube Industries, Tokyo, Japan)과

Table 1. Compositions and Sintering Conditions.

Sample	Batch(wt%)				Sintering Condition
	$\alpha - Si_3N_4$	$\beta - Si_3N_4$	Al_2O_3	Y_2O_3	1760 °C, 25 MPa Time
SN1	91	1	6	2	1hr
SN2	91	1	6	2	2hr
SN4	91	1	6	2	4hr
SN8	91	1	6	2	8hr

$\beta - Si_3N_4$ 분말 (Grade SN-P21FC, Denki Kagaku, Tokyo, Japan)을 사용하였고, 분말의 평균입경은 각각 $0.33\mu m$ 과 $0.56\mu m$ 이었다. 소결 첨가제로 Y_2O_3 (99.9% pure, Shin-Etsu Chemical Co., Tokyo, Japan)와 $\alpha - Al_2O_3$ (99.9% pure, Sumitomo Chemical co., Tokyo, Japan)를 사용하였다.

각 원료조합은 Si_3N_4 볼과 polyethylene 병을 사용하여 에탄올을 용매로 24시간 동안 습식 혼합한 후, 슬러리를 건조시키고 과립화 과정을 거쳤다. 소결은 $1760^\circ C$, 25MPa의 조건에서 N_2 분위기를 사용하여 각각 1~8시간 동안 일축 가압 소결하였다. 소결한 시편의 조성과 샘플의 이름들은 Table 1과 같다. 소결밀도는 아르키메데스 (archimedes) 방법을 사용하여 측정하였고, 소결된 시편들은 표면을 연마하여, CF_4 와 7.8% O_2 의 혼합가스로 플라즈마 에칭을 하였다. 미세구조는 주사전자현미경 (SEM)을 사용하여 관찰하였고, 결정상을 분석하기 위하여 시편들을 X-선 회절 분석 (XRD)을 하였다. 그리고 경도와 파괴인성은 비커스 경도 시험법으로 측정하였다.

제조된 각 시편들은 절삭특성 비교 시험을 위해 SNGN 120416의 크기로 시편을 가공하였으며, 톨 홀더는 절입각이 75° 인 CSRRN 2525M 12CEA type을 사용하였다. 절삭 가공실험에 사용된 공작기계는 CNC 선반 (HIT 15, 현대자동차 공작기계사업부)이며, 공구 현미경을 이용하여 세라믹 절삭 공구 flank 면의 평균 마모량이 $300\mu m$ 가 되었을 때까지의 시간을 공구수명으로 하여 절삭실험 하였다.

기준절삭 조건은 열처리된 고경도 SCM440 (AISI4140, 285~352HB)의 경우 절삭속도 $v=160m/min$, 이송량 $f=0.2mm/rev$, 절삭깊이 $d=0.25mm$ 로 절삭하였다. 또한, 회주철 (gray cast iron, FC250, 180~250HB)을 상용 Si_3N_4 세라믹 절삭공구의 추천절삭속도 (250~500m/min)

Table 2. Mechanical properties of cutting tools

Sample	Hardness (GPa)	Fracture Toughness (MPa m ^{1/2})	Grain size (μm)	Bulk Density (g/cm ³)
SN1	15.8±0.17	5.68±0.06	0.44	3.165
SN2	15.4±0.22	5.87±0.18	0.61	3.168
SN4	15.2±0.21	6.09±0.10	1.11	3.177
SN8	15.0±0.31	6.11±0.08	1.26	3.184
CN1	15.5	6.0	0.93	3.2
CN2	16.0	5.0	0.53	3.2
CN3	16.1	5.5	1.11	3.2
CN4	15.7	5.5	1.16	3.2

중의 하나인 v=330m/min와 이송량 f=0.2mm/rev, 절삭깊이 d=0.5mm와 d=1mm의 조건에서 상용공구와 비교 실험하였다. 비교실험에 사용된 상용공구는 AS10 (TaeguTec Ltd., Korea), SN26 (Ssangyong Cement Ind Co., Ltd., Korea), SX1 (NTK Ltd., Japan), KS6000 (Kyocera Ltd., Japan)이며 각각 순서대로 CN1~CN4로 나타내었다.

SN-Series (SN1~SN8)와 상용공구 (CN1~CN4)의 기계적 특성과 소결입자크기, 소결 밀도를 Table 2에 나타내었다.

2.2 회귀분석분석에 의한 공구수명 추정 방법

회귀분석 (regression analysis)이란 변수들 간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석 방법을 말하며, 일반적으로 이 추정된 모형을 사용하여 필요한 예측을 하거나 통계적 추론을 할 수 있게 된다.^(9, 10)

본 논문에서는 Si₃N₄계 절삭공구의 공구수명을 종속변수로 하고, 이 종속변수에 영향을 미칠 것으로 생각되어지는 경도 (hardness), 파괴인성 (fracture toughness), 결정립크기 (grain size)를 독립변수로 하여 공구수명 (tool life)과의 관계를 추정하였다. 종속변수 y (tool life)와 독립변수 x₁ (hardness), x₂ (fracture toughness), x₃ (grain size) 사이의 관계는 다음과 같이 선형관계를 가진다고 가정되었다

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{1i} + \hat{\beta}_2 x_{2i} + \hat{\beta}_3 x_{3i} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

여기서 상수 $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3)$ 값 들은 최소자승법을 이용하여 구하여졌다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Si₃N₄계 세라믹 절삭공구의 성능 평가

본 연구에 사용한 절삭 공구의 화학적 조성 and 소결조건은 Table 1에, 소결된 시편들과 상용 Si₃N₄계 세라믹 절삭공구의 경도, 파괴인성, 소결입자크기, 밀도는 Table 2에 나타내었다.

Fig. 1은 소결된 시편의 미세구조를 보여주고 있으며, 소결시간이 1시간에서 8시간으로 길어짐에 따라 소결입자크기가 증가하였다. 소결시간이 1시간인 SN1의 경우 출발원료 (0.33μm grain size)에서 약 0.11μm의 결정립생장이 일어났으며, 상용 Si₃N₄공구와 비교해서 가장 작은 소결입자 크기 (0.44μm)를 가지고 있었다. Fig. 1에 보이는 길게 자란 소결입자들은 시편들의 기계적 특성을 향상시키기 위해 종자입자 (seeds)로 첨가한 β-Si₃N₄로, 종자입자를 첨가함으로써 파괴인성 값이 증가하였다. Fig. 2는 소결 후의 XRD 측정을 한 결과로 1760 ° C에서 1~4시간 소결한 결과, 모든 시편들이 α-Si₃N₄ 상에서 β-Si₃N₄로 상변화 하였다. Si₃N₄의 경우 1650 ° C이상의 고온에서 β-Si₃N₄로 상변화를 하게 되는데, 이때 Si₃N₄ 입자들이 길이방향으로 길게 자라 파괴인성과 강도를 증가 시키게 된다.⁽⁵⁾

절삭성능을 향상시키기 위해 제조된 시편들의 성능을 알기 위해 열처리된 고경도강인 SCM440 (Heat treated SCM440, 285~352HB)와 저경도인 회주철 (FC250, 180~250HB)의 절삭 실험을 각 절삭공구별로 5회씩 수행하였다.

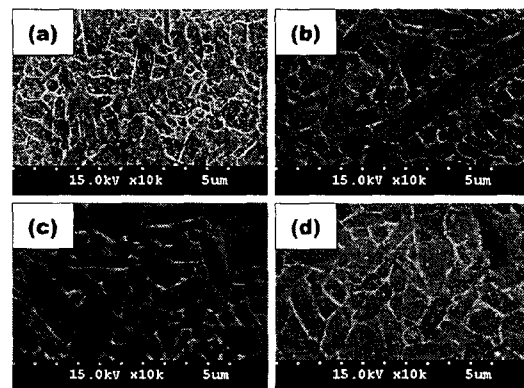


Fig. 1 SEM micrographs of hot-pressed samples : (a) SN1, (b) SN2, (c) SN4, (d) SN8 (refer to Table 1)

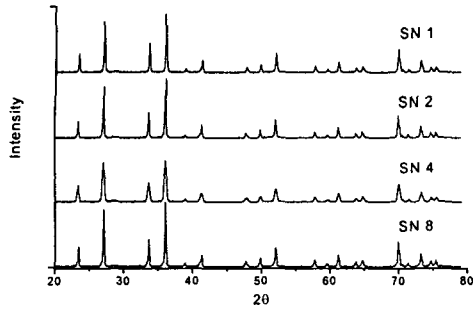


Fig. 2 XRD spectra of hot-pressed samples

Fig. 3은 열처리된 SCM440을 절삭 속도 $v=160\text{m/min}$, 이송량 $f=0.2\text{mm/rev}$, 절삭 깊이 $d=0.25\text{mm}$ 로 선삭 실험한 결과로, 매 15초마다 공구현미경을 통해 플랭크 마모를 측정 한 값들을 그래프로 나타내었다. 열처리된 SCM440의 절삭 실험결과 전체적으로 SN-Series가 좋은 절삭 성능을 나타내었으며, SN1이 $300\mu\text{m}$ 까지의 마모측정실험에서 65sec로 가장 좋은 절삭 특성을 나타내었다. 하지만 SN-Series의 경우도 다른 Si_3N_4 계 절삭공구와 마찬가지로 경도가 낮아 고경도강의 절삭에는 적합하지 않음을 알 수 있다.

회주철의 선삭 비교 실험에서는 절삭 속도 $v=330\text{m/min}$, 이송량 $f=0.2\text{mm/rev}$, 절삭 깊이 $d=0.5\text{mm}$ 와 $d=1\text{mm}$ 로 선삭 실험하고, 매 20초마다 공구현미경을 통해 $300\mu\text{m}$ 까지 플랭크 마모를 측정하였다. Fig. 5는 절삭 깊이가 $d=0.5\text{mm}$, Fig. 7은 절삭 깊이가 $d=1\text{mm}$ 일 때의 공구수명곡선 (flank wear curve)를 나타내며, 새로 개발한 SN-Series와 상용 Si_3N_4 계 절삭 공구의 비교 실험에서 SN-Series가 전체적으로 상용 Si_3N_4 계 절삭 공구에 비해 좋은 절삭 성능을 나타내었다. 특히 SN1의 경우 상용 Si_3N_4 절삭공구에 비해, 절삭 깊이 $d=0.5\text{mm}$ 일 때 1.3~1.8배, 절삭 깊이 $d=1\text{mm}$ 일 때 1.3~2.3배 정도의 우수한 절삭 성능을 나타내었다. 20초까지의 초기 마모구간에서도 SN-Series는 상용 Si_3N_4 절삭 공구보다 적은 플랭크 마모를 나타내었고, SN-Series는 공구수명곡선에서 볼 수 있듯이 $300\mu\text{m}$ 까지의 마모구간에서도 플랭크 마모가 점진적으로 증가하였다. 또한 SN-Series의 경우 회주철의 절삭실험에서 소결시간, 경도, 파괴인성, 소결입자크기에 대한 경향성이 관찰 되었다. 소결 시간이 길어짐에 따라 경도와 공구수명은 감소하였고, 파괴인성과 소결입자크기는 증가하였다. 상용 Si_3N_4 계 절삭공구의 경우는 출발원료와 소결 첨가제의 종류와 양, 제조공정이 모두 다르기 때문에 특별한 경향성을 찾을 수 없었다.

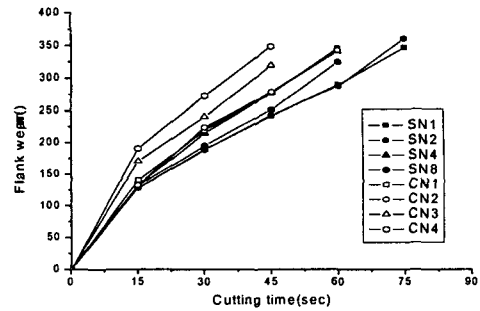


Fig. 3 Flank wear curve of Si_3N_4 insert during machining heat treated SCM440 under 160m/min , cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut

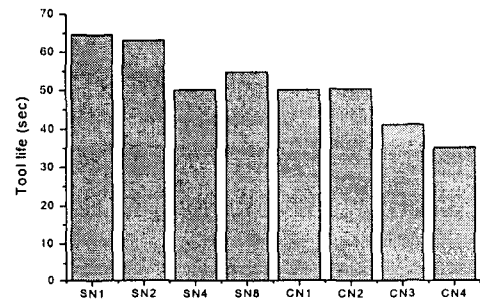


Fig. 4 Tool life of Si_3N_4 insert during machining heat treated SCM440 under 160m/min , cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.25mm depth of cut when flank wear is $300\mu\text{m}$

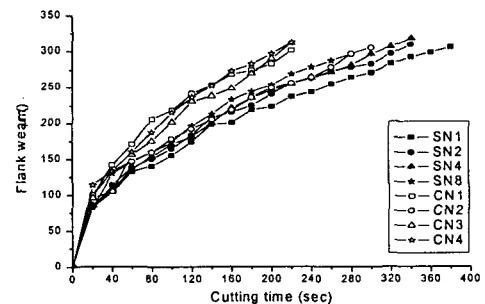


Fig. 5 Flank wear curve of Si_3N_4 insert during machining gray cast iron under 330m/min , cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.5mm depth of cut

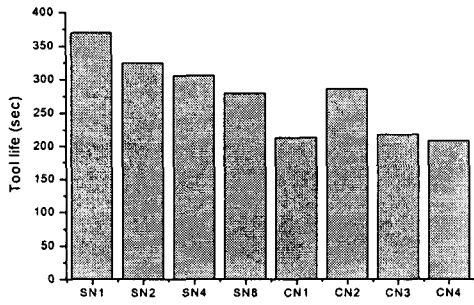


Fig. 6 Tool life of Si_3N_4 insert during machining gray cast iron under 330m/min, cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 0.5mm depth of cut when flank wear is $300\mu\text{m}$

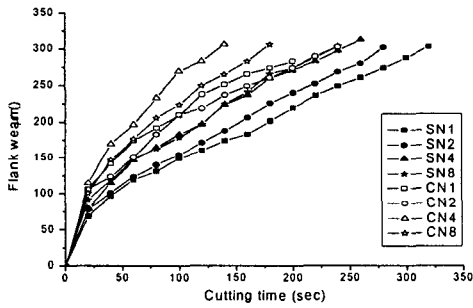


Fig. 7 Flank wear curve of Si_3N_4 insert during machining gray cast iron under 330m/min, cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 1mm depth of cut

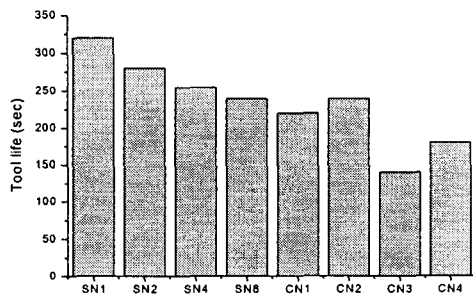


Fig. 8 Tool life of Si_3N_4 insert during machining gray cast iron under 330m/min, cutting speed with 0.2mm/rev feed rate and 1mm depth of cut when flank wear is $300\mu\text{m}$

3.2 회귀분석분석에 의한 공구수명 추정

회귀분석에 의한 공구수명 추정을 위한 표본데이터로 공구수명과 밀접한 관계가 있는 경도, 파괴인성, 소결입자 크기를 선정하였다.

Fig. 9에 회주철의 선삭 실험 결과 얻어진 공구수명과 경도, 파괴인성, 소결입자크기를 나타내었다.

단순회귀분석 (simple regression analysis)을 이용한 종속변수인 공구수명과 독립변수인 경도, 파괴인성, 소결입자 크기 사이의 회귀 직선을 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12에 각각 나타내었다. Fig. 10에서 공구수명과 경도는 양의 상관관계를, Fig. 11, Fig. 12에서 파괴인성과 소결 입자는 공구수명과 음의 상관관계를 가짐을 알 수 있다.

또한 절삭 깊이가 0.5mm, 1mm일 때의 추정된 계수 값들을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 결정 계수 값이 $R^2 = 0.9981$ ($d=0.5\text{mm}$), $R^2 = 0.9953$ ($d=1\text{mm}$)으로 경도가 공구 수명과 양의 관계를 가장 잘 추정하였다. 또한, 파괴인성과 소결입자크기도 공구 수명과 밀접한 관계가 있음을 결정계수 값 (r^2)을 통하여 알 수 있다. 단순회귀분석을 통해 경도, 파괴인성, 소결입자크기가 공구 수명과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었으며, 단순 회귀분석에 비해 좀 더 정도 (precision) 좋은 상관관계를 추정하기 위해 중회귀분석 (multiple linear regression analysis)을 하였다.

중회귀분석에 의해 구해진 회귀방정식은 절삭 깊이가 $d=0.5\text{mm}$ 일 때 식 (2), 절삭 깊이가 $d=1\text{mm}$ 일 때 식 (3)과 같으며, 중회귀분석을 통해 얻어진 회귀 방정식에 독립변수인 경도, 파괴인성, 소결입자크기를 넣어서 공구 수명을 역으로

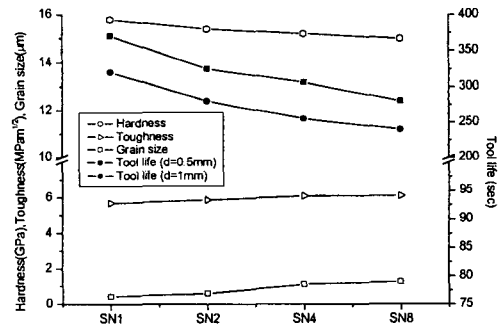


Fig. 9 Tool life, hardness, toughness, grain size of SN-Series

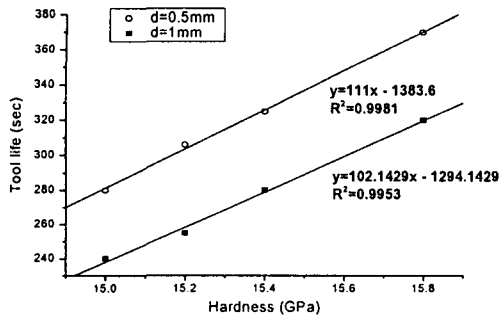


Fig. 10 Scatter diagram and estimated regression equation by simple regression analysis when independent variables are hardness

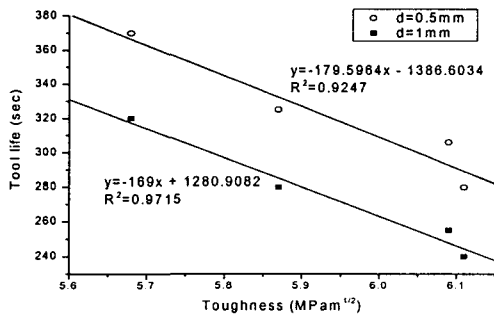


Fig. 11 Scatter diagram and estimated regression equation by simple regression analysis when independent variables are fracture toughness

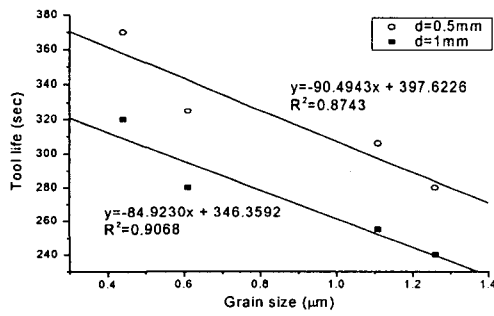


Fig. 12 Scatter diagram and estimated regression equation by simple regression analysis when independent variables are grain size

Table 3. Estimated Tool life by multiple regression analysis, when depth of cut is 0.5mm

	SN1	SN2	SN4	SN8
Experimental tool life(sec)	370	325	306	280
Estimated tool life(sec)	370	325	306	280

Table 4. Estimated Tool life by multiple regression analysis, when depth of cut is 1mm

	SN1	SN2	SN4	SN8
Experimental tool life(sec)	320	280	255	240
Estimated tool life(sec)	320	280	255	240

로 추정하여 절삭 깊이가 d=0.5mm일 때의 결과를 Table 3에, d=1mm일 때의 결과를 Table 4에 나타내었다.

$$\hat{y} = -1939.9503 + 130.9363x_1 + 42.8025x_2 - 4.4586x_3 \quad (2)$$

$$\hat{y} = -499.3567 + 73.6624x_1 - 61.1465x_2 + 6.3694x_3 \quad (3)$$

또한, 중 회귀 분석에서 절삭 깊이가 d=0.5mm, d=1mm일 때 결정 계수 값은 두 가지 경우 모두 $R^2 = 0.9999$ 로 단순회귀분석을 하였을 때, 가장 좋은 결정계수 값을 나타내었던 정도보다 정도가 더 좋음을 알 수 있다.

Table 3과 Table 4에서 알 수 있듯이 중회귀분석에 의해 구해진 회귀 방정식이 공구 수명을 정확히 추정하였다. 또한, 단순회귀분석과 중회귀분석을 통해 정도가 공구수명과 가장 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

예를 들어 식 (16), 식 (17)에 의해 SN1의 정도가 1GPa 올라갈 경우 SN1의 공구 수명은 절삭 깊이가 d=0.5mm일 때 501sec, d=1mm일 때 394sec로 공구 수명 증가가 예상되어진다.

4. 결론

Si_3N_4 계 상용세라믹 공구와 새롭게 개발한 Si_3N_4 계 세라믹 절삭공구인 SN-Series로 열처리한 SCM440과 회주철을 공작물로 하여 마모가 $300\mu m$ 가 될 때까지의 플랭크 마모

를 공구 수명으로 하여 절삭성능을 비교 분석하였다. 또한, 회귀분석을 통하여 공구수명과 밀접한 관계가 있는 경도 (hardness), 파괴인성, 소결입자크기를 독립변수로 하여 종속변수인 공구수명을 추정하였다.

- (1) 소결시간을 달리한 SN-Series의 미세구조 관찰 결과 상용 Si_3N_4 계 절삭공구와 SN-Series 중에 SN1이 가장 작은 소결입자크기를 가지고 있었고, 소결시간이 길어짐에 따라 소결입자크기와 파괴인성은 증가하였고 경도는 감소하는 경향성을 나타내었다.
- (2) 회주철의 건식 선삭 실험에서는 절삭 깊이가 $d=0.5\text{mm}$, $d=1\text{mm}$ 일 때 SN-Series가 전체적으로 좋은 마모 특성을 나타내었고, 특히 SN-Series중 소결시간이 1시간인 SN1이 가장 좋은 절삭 성능을 나타내었다.
- (3) 공구수명과 밀접한 관계가 있는 경도, 파괴인성, 소결입자크기와 공구수명과의 상관분석결과 경도는 양의 상관관계, 파괴인성과 소결입자크기 사이에는 음의 상관관계가 있었다.
- (4) 경도, 파괴인성, 소결입자크기를 독립변수로 하여 종속변수인 공구수명에 대한 중회귀분석을 하였고, 이때, 구해진 회귀방정식의 결정계수는 $R^2 = 0.9999$ 로 상당히 좋은 정도를 가지고 있었으며, 공구수명을 정확히 추정하였다.
- (5) 단순회귀분석과 중회귀분석 결과 경도가 공구수명과 가장 밀접한 관계가 있었고, Si_3N_4 계 세라믹 절삭공구의 경우 경도를 높임으로써 공구수명 증가시킬 수 있을 것으로 추측된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (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) G. K. L Goh, L. C. Lim, M. Rahman, S. C. Lim, "Effect of grain size on wear behavior of alumina cutting tools", *Wear*206, pp.24~32, 1997
- (3) Steven F. Wayne, Sergel-Tomislav Buljan, "The Role of Thermal Shock on Tool Life of Selected Ceramic Cutting Tool Material", *J. Am. Ceramic Soc.*, Vol. 72, No. 5, pp.754~760, 1989
- (4) David Bordui, "Hard Part Machining with Ceramic Inserts", *Ceramic Bulletin* Vol. 67, pp. 998~1001, 1988
- (5) Y-L. Lee, Y-W. Kim, H-J. Choi, J-G. Lee, "Mechanical Properties of SiC-Si₃N₄ Mechanical Properties of SiC Composites Containing β -Si₃N₄ Seeds", *Journal of Korean Ceramic Society*, Vol. 38, No. 1, pp.22~27, 2001
- (6) H-J Choi, J-G Lee, Y-W Kim, "High temperature strength and oxidation behaviour of hot-pressed silicon nitride-disilicate ceramics", *Journal of Materials Science* 32, pp.1937~1942, 1997
- (7) M. Szarfan, 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
- (8) J. G. Baldoni, S. F. Wayne and S. T. Buljan, "Cutting Tool Materials Mechanical Properties-Wear-Resistance Relationships", *ASLE Trans*, Vol. 29, 3, 347~352, 1985
- (9) Seber, G. A. F, "Linear Regression Analysis", New York, John Wiley & Sons, 1977
- (10) S. H. Park, "Regression analysis", Min Young Inc., Seoul, 1999.