論文 한국공작기계학회지 제 7 권 제 4 호 1998. 8.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

세라믹공구와 TiN피복 세라믹공구의 초기파손에 관한 비교 연구

이 명 재* 유 봉 환**

Comparative Study on the Ceramic and the TiN Coated Ceramic Tools for the Early Fracture

Myung-Jae Lee*, Bong-Hwan Ryu**

Abstract

Ceramic and CBN tools are available for the difficult-to-cut-materials such as hardened carbon tool steel, stainless steel and etc. Ceramic tools are suitable for continuous turning cut, not for intermittent milling cut.

Ceramic tools are likely to be chipped and abruptly broken before the appearance of normal wear in turning.

In this study, TiN coated ceramic tools were found to restrain the chipping, breaking and early fracture and to increase the critical cutting velocity owing to TiN coating in PVD method.

Keywords : Ceramic Tool(세라믹공구),Difficult-to-Cut-Material(난삭재) TiN Coated Ceramic Tool (TiN 피복 세라믹 공구), PVD(물리증착피복), Critical Cutting Velocity(임계속도)

1. 서 론

최근 생산공정의 능률화, 자동화의 요구는 제품생산에 기초가 되는 금형 제작에서도 재료의 고경도화를 가속시키고 있다. 종래의 고경도재의 가공은 방전가공이나 연삭가공이 주류를 이루고 있으나, 공작기계의 발전과 공구 성능의 향상으로 그 가공범위가 확대되고 있다. 이러한 가공을 대체시킬 수 있는 충분한 경도와 내마모성, 내열성을 가진 공구가 필요하다. 그 대표적인 공구로 CBN 공구, 다결정 다이아몬드 PCD(polycrystal diamond) 또는 세라믹공구 등을 예로 들 수 있다. 일반적으로 난삭재의 경우 초경공구로 가공할 수 있으나, 작업능률이 나쁘고 공구수명이 짧고 생산성이 낮은 결점을 가지고 있다.

이러한 공구는 경화강이나 열처리된 금형강재의 경우 절삭이 가능한 공구로서 이중 세라믹공구는 단속절삭에는 적합하지 않지만, 연속절삭이 가능한 공구로서 특히 세라믹공구는 Al_2O_3에 TiC를 첨가시킨 공구이다. 이 세라믹공구는 CBN 공구에 비하여 우수한 내마멸성을 갖고 있다

* 성남기능대학
** 숭실대학교

는 연구가 보고된 바 있다.

그러나 실용적인 측면에서 세라믹공구는 돌발적인 파손(castrophic fracture)과 절삭날의 결손을 고려하여야 하며, 이러한 결손과 파손은 세라믹공구의 정상적인 마모가 진행이 되기 전인 절삭초기에 발생하는 경향이 있다. 이러한 절삭초기에 발생되는 파손과 결손에 대한 연구는 다수 있으나, 대부분 초경공구에 관한 것이며, 최근에 들어 세라믹 공구의 초기파손과 결함에 대한 연구가 이루어 졌다[1][2]. 그러나 세라믹공구를 사용한 기계가공시 초기에 발생하는 초기파손, 치핑과 절삭날 결손을 억제시키는 방법에 대한 연구는 미흡한 상태이다.

현재의 절삭가공의 경향은 고능률화, 고정밀화, 고속화로 발전되고 있다. 특히 고능률화로부터 요구되는 고속가공에 적합한 공구의 개발이 절실히 요구되며, 공작물과 공구와의 마찰감소, 절삭시 온도상승의 억제, 긁힘마모저항 등의 장점이 우수한 코팅공구의 절삭특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히, 긁힘이나 응착에 의해 발생되는 플랭크 마멸 그리고 주로 열의 영향에 의해 발생하는 크레이터 마멸 등은 코팅의 효과로서 공구마모를 지연시키고 여러 가지의 공구성능을 개선시키는 역할을 한다. 따라서 플랭크면에서는 코팅의 성질중 경도와 부착력을 고려해야 하고, 레이크면의 코팅은 열이 공구에 전달되어 모재 전체의 온도상승을 가져온다[3].

그러므로 본 논문에서는 기존의 세라믹공구에 초기파손과 절삭날의 결손, 치핑을 억제시키기 위한 방안으로 공구에 피복처리를 하여 절삭초기에 발생하는 초기파손의 임계속도를 증가시킴으로써 절삭공구의 성능을 향상시키는 것이다. 이와 같은 초기파손의 억제 방법으로 공작물과 절삭공구의 물림조건에 따른 절삭단면의 절삭두께, 절삭폭을 해석하여 초기파손이 억제됨을 시험적으로 제시하고, 또한 이송, 절삭깊이 및 공구의 노즈반경을 포함한 함수에 의하여 결정되는 초기파손의 임계속도를 향상할 수 있음을 시험적으로 증명하였다. 기존의 세라믹공구에 피복하는 방법으로 초기파손의 억제 방안을 제시하였다.

2. 노즈반경을 갖는 3차원 절삭의 기하학적 해석

Fig. 1은 절삭공구가 노즈반경을 갖는 선삭가공에서 절삭깊이(d)가 노즈반경(r) 보다 작은 경우의 공구의 물림조건을 나타낸 것이다.[4] 노즈반경을 갖는 공구의 절삭단면의 형상은 두 개의 원호와 공작물 표면의 외각을 나타내는 직선으로 둘러 쌓여있다.

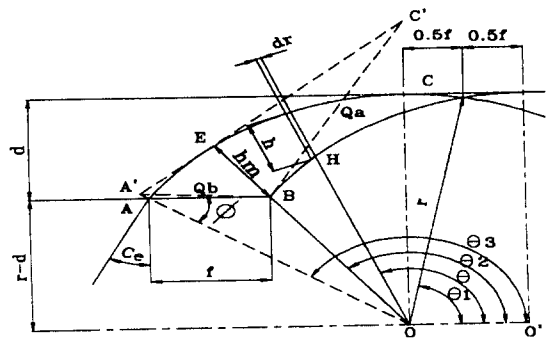

Fig. 1 Geometry of cutting cross-section or chip flow model for nose radius tool (d〈r)

즉, 최대절삭두께를 절삭날 노즈반경의 법선방향의 두께로 하면, 최대절삭두께(hm)는

$$hm = r - \sqrt{r^2+f^2-2f(r\cos\phi)}$$
$$= r - \sqrt{r^2+f^2-2f\sqrt{(2rd-d^2)}}$$

여기서 r은 절삭공구의 노즈반경, f는 이송, d는 절삭깊이이다.

그리고 최대절삭두께를 경계로 위·아래부분의 위치에 분리된 절삭면적 Q_a와 Q_b로 구분되어 나타나며 아래와 같이 적분하여 구할 수 있다.

$$Q = Q_a + Q_b = (\int dQ)_a + (\int dQ)_b$$

$$Q = r\cdot[\int\{r - f\cdot\cos\theta\sqrt{(r^2-f^2\cdot\sin^2\theta)}\}d\theta]_a$$

$$+ r\cdot[\int\{r-(r-d)\sec\theta\}d\theta]_b$$

또한 절삭에 관여하는 절삭날폭(AC)을 b로 나타내면 다음과 같다.

$$b = r(\cos^{-1}\frac{r-d}{r} + \sin^{-1}\frac{0.5f}{r})$$

그리고 공작물의 표면과 만나는 절삭날의 점 A에 있어서의 접선방향과 절삭깊이 방향이 이루는 각을 주절삭날각에 상당하는 유효어프로치각(effective approach

angle) C_e로 가정하면 다음과 같다.

$$C_e = \sin^{-1}\frac{r-d}{r}$$

3. 실험

3.1 실험장치

절삭실험은 범용선반을 사용했으며 원통형 공작물을 연동척에 설치하여 척의 중심과 일치시켜 고정하였다. Fig. 2는 실험장치의 개략도이며, 공구동력계는 왕복대에 설치하였고, 정확한 절삭깊이를 절입시키기 위하여 다이얼게이지를 사용하여 0.01㎜를 넣을 수 있도록 설치하였다. 또한 정확한 공작물의 경도측정을 위하여 휴대용 경도기(TIME HLN-11A LEEB'S hardness tester)를 이용하여 공작물의 경도를 측정할 수 있도록 하였다. 선삭시 요구되는 정확한 절삭가공속도를 맞추기 위하여 선반의 모터에 인버터(Starvert-Is3, 0-400Hz, 7.5Hp)를 연결하여 회전수를 조절할 수 있도록 가변형으로 만들었다. 또한 정확한 속도를 확인하기 위하여 타코메터를 사용하여 선반 척의 회전수를 측정하여 가공시험을 할 수 있도록 설치하였다. 그리고 초기파손을 조사하기 위하여 공구현미경 및 금속현미경을 사용하여 측정하였다.

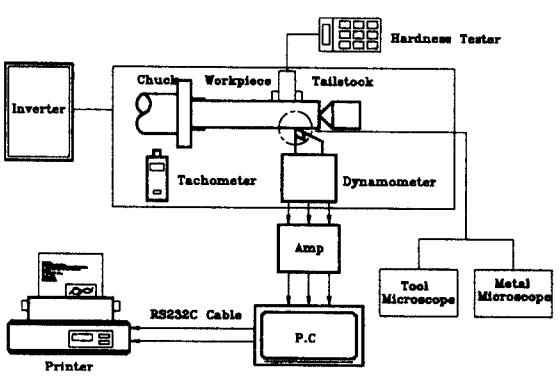

Fig. 2 Experimental set-up

절삭시에 발생하는 절삭저항의 3분력을 측정하기 위하여 압전형(Piezo-electric type)공구동력계(KISTLER 9257B)로 측정하였다. 절삭신호의 증폭은 용량형 앰프(charge amplifier, KISTLER 5019A)를 사용하였고, A/D변환기를 통하여 PC로 전송하여 데이터 처리를 하였으며, 절삭저항의 최대 측정범위는 주분력이 1000N, 배분력이 500N, 이송분력이 500N이다.

3.2 공구 및 공작물

본 실험에서 사용한 절삭공구의 재종은 기계적 충격과 열 충격에 강하여 고경도 강재의 절삭에 적합한 Al_2O_3/TiC인 세라믹공구를 선정하였다. 또한 초기파손의 억제를 위하여 세라믹공구에 PVD방식의 TiN을 피복하였다. 세라믹공구의 물리적 성질은 Table 1과 같고, TiN 피복 세라믹공구의 사양은 Table 2와 같다. 또한 Fig. 3은 인성에 약한 세라믹공구와 TiN 피복세라믹공구의 모서리에 적용된 챔퍼(chamfer) 크기의 형상이며, 크기는 -25° × 0.2㎜이다. 그리고 인서트형인 SNGN1207의 세라믹공구와 SNGN1207의 TiN 피복 세라믹공구를 사용하였다. 공구홀더는 클램프 체결용으로서 어프로치 각이 15° 인, CSHNR2520홀더를 사용하였다.

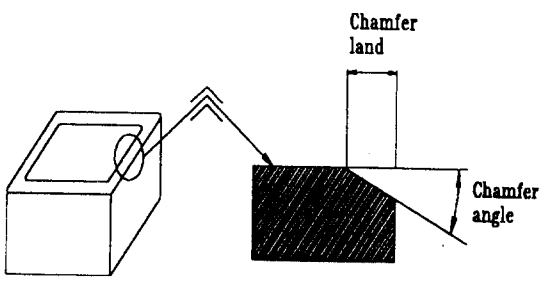

Fig. 3 Feature of ceramic and TiN coated ceramic tool with edge chamfer

Table 1 Physical properties of ceramic tool

Composition	Modulus rupture	Hardness	Density	Fracture toughness	Thermal expansion efficient(α)
Al_2O_3+TiC	kg/mm^2	H_RA	g/cm^3	MN/m$^{1.5}$	10^{-6}℃
	80	94.5	4.4	4.9	7.8

Table 2 Physical properties of TiN coated ceramic tool

Coated property	TiN
Coated thickness(㎛)	2.0
Coating principle	PVD

3.3 공작물

본 실험에 사용한 재료는 탄소공구강(STC3)으로서 그 화학적 성분비는 Table 3과 같고, 열처리 조건과 경도는 Table 4와 같다.

ϕ70×205mm인 탄소공구강을 1차 가공 후 열처리하였다. 경화강의 환봉을 주축의 연동척에 고정하고 전 길이에 대하여 가공을 실시하여 공작물의 중심과 척의 중심을 동시에 맞추었다. Fig. 4는 공작물의 형상을 나타낸 것이며, 선반의 정밀도는 가공 전에 KS B 0425에 의하여 조정하였다. 또한 정밀한 가공을 하기 위하여 새로운 연동척을 사용했으며, 가공시 선반의 진동을 방지하기 위하여 기초작업(foundation) 후 실험을 수행했다. 그리고 절삭실험시 편심을 없애기 위하여 축방향으로 전 길이에 대하여 가공을 실시하였다. 따라서 최종 공작물의 크기는 직경 68mm, 길이 200mm로 제작하였다.

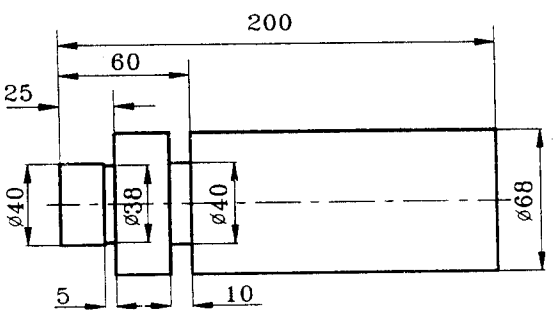

Fig. 4 Workpiece

Table 3 Chemical compositions of work material

Workpiece	Chemical compositions, %							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Ni
STC3	1.02	0.39	0.03	0.002	0.24	0.13	0.10	0.05

Table 4 Heat treatment and hardness of STC3

Work piece	Hardness (H_RC)	Quenching temperature (℃)	Tempering temperature (℃)	Heat treatment
STC3	58~62	850	180	Tempering in electric furnace after salt bathing

3.4 실험방법

일반적으로 생산성 측면에서 절삭속도가 낮아지면 응착정도나 긁힘에 의한 마모가 증가하여 생산성이 낮아지고, 반대로 절삭속도를 올리면 절삭온도가 상승하여 절삭날에 절삭열이 집중되어 이상 손상을 일으키는 원인이 된다. 그러므로 공작물에 따른 절삭조건의 선정도 매우 중요하다. 즉, 절삭깊이와 이송의 곱이 절삭면적이 되고, 이 절삭면적에 따른 절삭속도의 증가가 생산성 향상에 영향을 미치는 것이다. 그러므로 세라믹공구 초기에 발생되는 결손의 억제에 따른 절삭속도의 증가는 생산성 향상을 가져올 수 있다.

Table 5 Cutting test conditions

	1	2	3	4
Insert	TiN coated tool Uncoated tool			
V(m/min)	10-200 m/min			
f(mm/rev)	0.2 0.17 0.13 0.10	0.17	0.20 0.17 0.15 0.13	0.20 0.17 0.13 0.10
d(mm)	0.4	0.4	0.226 0.299 0.387 0.579	0.287 0.300 0.310 0.330
hm(mm)			0.124	0.142 0.124 0.098 0.079
b(mm)			0.717 0.800 0.898 1.098	0.800
r(mm)	0.8	0.8 1.2 1.6 2.0	0.8	0.8

본 논문에서는 세라믹공구와 TiN 피복 세라믹공구를 사용하여 탄소공구강의 절삭초기에 발생하는 공구손상의 억제를 비교하기 위하여 절삭속도, 이송, 절삭깊이의 관계인 절삭조건과 이송과 절삭깊이, 노즈반경의 함수로 구성된 절삭두께, 절삭폭의 절삭조건에 대하여 시험하였다.

그리고 절삭시험에 사용된 절삭조건은 세라믹공구 추천치(5)를 사용하여 시험하였으며 연삭의 공정을 고려하여 10~200m/min의 절삭속도를 적용하였다. TiN 피복 세라믹공구의 공구손상을 시험하기 위하여 이송은 0.2mm/rev이하, 절삭깊이는 0.579mm 이하의 절삭조건에서 Table 5와 같이 시험하였다. 데이터는 같은 조건을 4회 실시하여 평균값을 취하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

TiN 피복 세라믹공구는 기존의 세라믹공구에 비하여 고온에서 내산화 특성이 우수하며, 절삭날 결손, 윤활성이 향상되어 공구의 수명이 증가될 것으로 판단되며, 또한 치핑이 적어 안정된 가공이 가능하다고 사료된다. 또한 TiN 피복의 색이 황금 색갈을 띠고 있으므로 사용 중에 절삭유를 명확하게 코너에 투입할 수 있어 사용하기 쉬운 장점을 가지고 있다. TiN 피복을 함으로써 기존의 세라믹공구보다 성능이 향상되어 난삭재 가공에서 생산원가 절감을 가져올 수 있는 가능성을 제시한 공구라고 판단된다.

4.1 이송의 영향과 임계속도

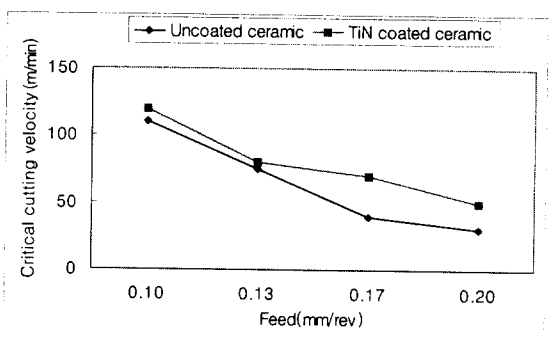

Fig. 5 Relation of feed rate and critical cutting velocity

Fig. 5는 노즈반경이 0.8mm인 세라믹공구와 TiN 피복 세라믹공구를 사용하여 절삭깊이 0.4mm로 일정하게 한 다음, 이송을 0.10, 0.13, 0.17, 0.20mm/rev로 변화시킨 후 초기파손에 따른 임계속도변화의 관계를 실험한 것이다.

각 절삭조건의 임계절삭속도를 나타낸 그래프의 아래에서는 정상적인 가공이 가능하며, 그래프의 상측의 고속영역에서는 대부분 순간적으로 초기파손이 생기는 영역이다.

이송의 모든 영역에서 TiN 피복 세라믹공구가 세라믹공구보다 전반적으로 5~30 m/min 이상의 향상을 가져왔다. 특히 이송이 큰 부위에서 TiN 피복 세라믹공구가 우수하다는 것을 알 수 있는데, 이는 피복의 효과에 의해서 임계속도가 올라갔음을 실험적으로 알 수 있다. 이송이 적은 부위에서는 세라믹공구와 TiN 피복 세라믹공구의 임계속도 차가 작은 것은 속도가 높아지면 절삭온도의 상승으로 인하여 피복의 효과가 감소한다는 것을 알 수 있으며, 이는 모재의 피복이 높은 가공온도로 인하여 산화되기 때문이라고 판단된다.

4.2 Nose반경의 변화와 임계속도

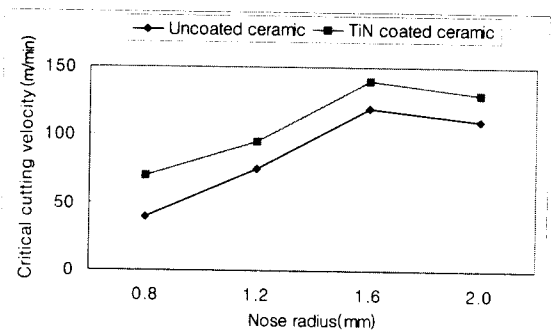

Fig. 6 Relation of nose radius and critical cutting velocity

Fig. 6과 같이 노즈반경을 0.8, 1.2, 1.6, 2.0mm로 구분하여 0.17mm/ rev의 이송과 0.4mm의 절삭깊이를 일정하게 하고 임계속도의 관계를 시험한 것이다. 노즈반경의 변화에 따른 세라믹공구와 TiN 피복 세라믹공구의 임계속도의 변화는 노즈반경 0.8mm에서 임계속도 30m/min, 노즈반경 1.2mm, 1.6mm, 2.0mm에서 임계속도 20m/min의 향상을 가져왔다. 노즈반경의 변화에서도 TiN 피복 세라믹공구가 모든 노즈반경에서 우수하다는 것을 알 수 있다. 그리고 0.8mm의 노즈반경을 갖는 TiN 피복 세라믹공구가 1.2mm의 세라믹공구와 비슷한 성능을 내고 있다. 이는 TiN 피복 효과가 기하학적 모양을 대치시켜 사용할 수 있다고 판단된다. 절삭단면의 형상에서 노즈반경이 증가하게 되면 일정한 절삭조건에서 절삭면적은 같으나 유효어프로치각은 증가하고 최대절삭 두께가 감소하게 되어 절삭날 부위가 상대적으로 증대되어

절삭날 부위가 공작물과 점진적으로 접촉하여 충격하중이 감소하는데, 이는 TiN 피복 세라믹공구에서도 거의 같은 경향을 나타나고 있다. Fig. 6에서 세라믹공구의 노즈반경 1.2mm의 경우는 TiN 피복 세라믹공구 노즈반경 0.8mm, 세라믹공구의 노즈반경 1.6mm는 TiN 피복 세라믹공구 노즈반경 1.2mm, 세라믹공구의 노즈반경 2.0mm는 TiN 피복 세라믹공구 노즈반경 1.6mm로 대치하여 사용할 수 있다는 것을 알 수 있었으며, TiN 피복 세라믹공구가 전반적으로 20~30m/min의 임계속도가 상승하였으며 피복으로 인하여 초기파손을 억제시킬 수 있는 것을 알 수 있다.

4.3 절삭폭 변화와 임계속도

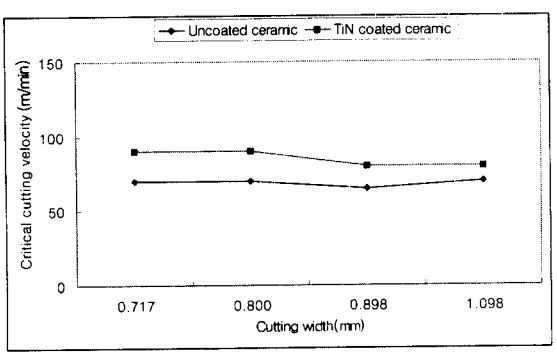

Fig. 7 Relation of cutting width and critical cutting velocity

Fig. 7은 이송을 0.13, 0.15, 0.17, 0.2mm/rev과 절삭깊이 0.579, 0.387, 0.299, 0.226mm를 조합하여 최대절삭두께를 0.124mm로 일정하게 하고, 0.717, 0.800, 0.898, 1.098mm로 절삭폭을 증가시켜 임계속도를 조사한 결과 절삭면적이 0.045, 0.0508, 0.0581, 0.075mm^2 증가에도 불구하고 거의 일정한 임계속도의 값을 갖으면서 TiN 피복 세라믹공구가 임계속도가 10~20m/min 증가하여 초기파손이 억제됨을 알 수 있다.

4.4 최대절삭두께변화와 임계속도의 관계

Fig. 8은 이송을 0.1, 0.13, 0.17, 0.20mm/rev과 절삭깊이 0.330, 0.310, 0.300, 0.287mm를 조합하여 절삭폭을 0.800mm로 일정하게 하고, 0.079, 0.098, 0.124, 0.142mm로 구분하여 최대절삭두께의 변화에 따른 임계속도의 관계를 실험하였다.

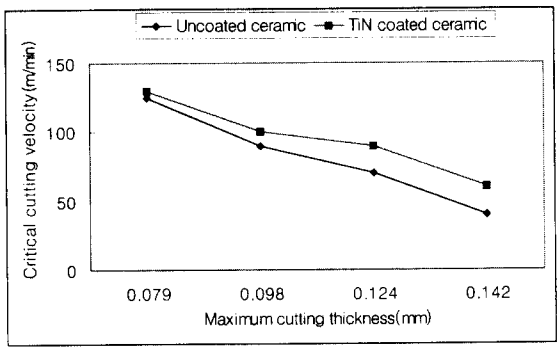

Fig. 8 Relation of maximum cutting thickness and critical cutting velocity

Fig. 8에서 최대절삭두께가 커지면 임계속도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 전반적으로 임계속도의 변화는 최대절삭두께가 0.079에서 5m/min, 0.098에서 10m/min, 0.124에서 20m/min, 0.142에서 20m/min으로 TiN 피복 세라믹공구가 더 향상되었다. 즉 피복으로 인하여 초기파손이 억제되었음을 알 수 있었다.

절삭날의 단위길이당 절삭면적이 최대로 되는 영역인 최대절삭두께의 위치에서 최대절삭면적이 나타나므로 이곳에서 절삭날의 부담이 가장 크게 된다. 따라서 최대절삭두께가 증가하면 초기파손을 일으키는 임계속도는 낮아지게 된다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 TiN 피복 세라믹공구가 세라믹공구보다 5~20m/min의 임계속도가 상승하여 TiN 피복 세라믹공구가 초기파손이 억제되었음을 알 수 있다.

5. 결론

경화 열처리한 탄소공구강(STC3)의 절삭 조건에 따라서, 세라믹공구와 TiN 피복 세라믹공구로 선삭 가공할 때 피복의 효과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) TiN 피복의 효과가 우수하고 세라믹공구에 비교하면, 이송의 변화에 따른 임계속도가 향상되어 초기파손이 억제되었다.

(2) TiN 피복의 효과로 인하여 TiN 피복 세라믹공구는 세라믹공구의 노즈반경보다 작게 하여 사용할 수 있다.

(3) 노즈반경의 변화에 따른 임계속도가 세라믹공구보다 TiN 피복 세라믹공구가 크다.

6. 참고문헌

(1) 김광래, 유봉환, 1995, "탄소공구강에 대한 세라믹 공구의 초기파손 특성에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제12권, 제6호, pp. 112~119.

(2) Oishi,K. and Nishida, T., 1989, "Early Fracture of Ceramic Tools in Turning of Hardness Steel(1st report)," JSPE, Vol. 55, No. 9, pp. 1657 ~ 1662.

(3) Kenneth H. and Allan M., Coatings Tribology, Elsevier, 1994

(4) Young, H.Y., Mathew, P. and Oxely, P.L.B., 1987, "Allowing for Nose Radius Effects in Predicting the Chip Flow Direction and Cutting Forces in Bar Turning," Proc. Int. Mech. Eng. Part C., Vol. 201, No. 3, pp.213~226.

(5) Dow, W. E., Ceramic Cutting Tool, Noyes Publications, New Jersey, 1994.