자기연마기술을 이용한 고속절삭공구의 성능향상에 관한 연구 (고속절삭공구의 성능평가를 중심으로)

조종래*(창원대 대학원 기계공학과), 양순철((주)윈트), 정윤교(창원대 기계공학과)

A Study on the Improvement of Performance of High Speed Cutting Tool using Magnetic Fluid Grinding Technique (A Performance Estimation of High Speed Cutting Tool)

J. R. Cho(Mech. Eng. Dept., Graduate School, CWU), S. C. Yang(WINTT Co., Ltd), Y. G. Jung(Mech. Eng. Dept., CWU)

ABSTRACT

In high speed cutting process, due to the friction between the tool and workpiece, a temperature rise of contacting part is serious. It need to develop cutting tool for overcoming such a poor condition. So now, some studies, the optimization of tool shapes, the fine grains of tool material, multi-layer coating of tools are processing. If mirror finishing on the tool is processed, there is advantage of relation between chip and tool, because of less friction, and also tool's life would be increased. As a result mirror like finishing is expected efficient enhancement of tool. Generally, it is too difficult to process by a general way for tools of complex shapes, it is required a new method to process such complex shape tools. The magnetic fluid polishing technique can polish the workpiece of complex shape, because the polishing method which polishes as compress the workpiece by the magnetism abrasives to arrange to the linear according to the line of magnetic force. In this paper, We polished the surface of the high speed cutting tool using the magnetic fluid polishing technique, to enhance the performance of the high speed cutting tool.

Key Words : High speed cutting process(고속절삭), Magnetic fluid polishing technique (자기연마기술), Tool's life (공구수명), Mirror like finishing(경면연마), High speed cutting tool(고속절삭공구)

1. 서론

금형산업이 발달함에 따라 난삭재의 활용이 높아지고, 산업계의 고정밀 및 고능률 가공에 대한 요구가 급증함에 따라 고속가공에 대한 연구가 절실히 요구되고 있으나, 고속가공시 공구와 공작물간의 마찰로 인하여 접촉부의 온도상승이 심각하며, 절삭속도를 증가시키면 시킬수록 온도가 더욱 상승하여 공구마멸을 촉진시킨다. 이러한 가혹한 절삭조건에 견딜 수 있는 고속절삭공구의 개발이 요구되며, 공구형상의 최적화, 공구재종의 초미립화 및 고경도화, 공구의 다층 피복화 등에 대한 연구[1,2]가 수행중이다. 한편, 공구표면을 경면가공하면 공작물간의 마찰이 적어 과도한 인선환경에 유리하고, 공구수명도 증대한다는 보고[3]가 있어 절삭공구 표면의 경면화로 공구성능 향상이 기대되어진다. 그러나 엔드밀과 같이 형상이 복잡한 절삭공구는 일반적인 연마방법으로는 경면가공하기 어려우므로, 형상이 복잡한 절삭공구도 연마할 수 있는 새로운 연마방법이 요구된다. 자기연마기술은 자력선에 따라 선형으로 배열한 자성연마재가 자력에 의해 공작물을 압착하면서 연마하는 가공법[4]으로 요철이 심하고 복잡한 형상의 공작물도 연마할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 자기연마기술을 이용하여 고속절삭공구의 표면을 연마하여 절삭공구의 성능을 향상시키고자 한다.

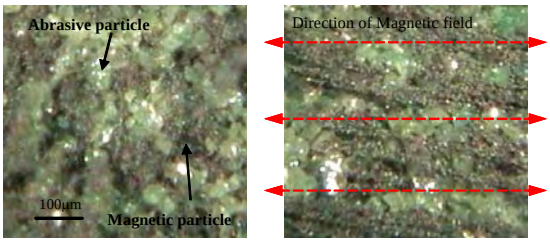
2. 자기연마장치 및 실험방법

2.1 자기연마 장치

자기연마란 자성재료와 연마입자를 구성요소로 하는 자성연마재를 사용하여, 자력선에 따라 선형으로 배열한 자성연마재가 자력에 의해 공작물을 압착하면서 연마하는 가공법이다.[4] 이와 같이 자기연마법은 종래의 연마공구를 사용하는 가공법과는 상이하게 자성연마재가 공작물의 요철을 압착하면서 가공하므로 3차원 자유곡면이나 원통공작물, 파이프내관 등의 연마에 효과적이다.[4,5,6]

자성연마재는 자성재료와 연마입자를 금속학적으로 일체화한 형태와 단순히 혼합한 형태가 있는데, 일체형은 제조의 어려움, 사용상의 제약 등의 단점이 있는 반면, 단순혼합형은 명칭에서 알 수 있듯이 자성재료와 연마입자를 단순히 혼합한 형태이다.

Fig. 1은 단순혼합형 자성연마재의 사진으로 그림 (a)자장이 흐르지 않은 상태이고, 그림 (b)는 자장이 흐를때의 자성입자와 연마입자의 배열모습을 보여주고 있다. 이렇게 자장의 유무에 따라 자성입자와 연마입자의 배열 상태가 달라짐에 따라 연마압력이 발생하게 된다.



(a) No magnetic field (b) Magnetic field

Fig. 1 Simply mixed oil bonded magnetic abrasives

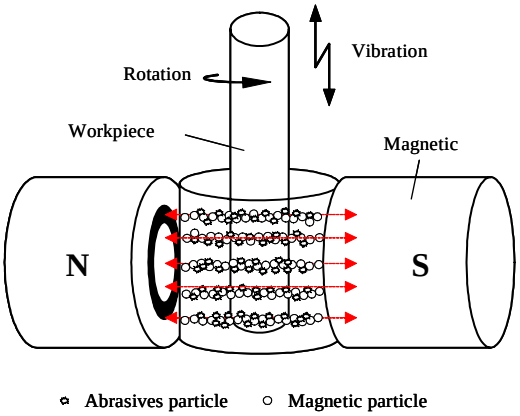


Fig. 2 Schematic diagram of polishing

Fig. 2는 단순혼합형 자성연마재를 이용하여 연마작업을 하는 개략도이다. 그림에서 보는바와 같이, 자성입자가 자기장방향으로 배열하게 되면 자성입자 사이에 게재되어 있던 연마입자도 자기장방향으로 나열하게 되면서 자성입자에 의해 고정하게 된다. 이렇게 자성입자와 연마입자가 자기장방향으로 배열하려고 하는 힘이 연마압력으로 작용하게 된다. 공작물이 회전하면서 상하로 움직이게 되면 복잡한 연마궤적을 가지게 된다.

Fig. 3은 고속절삭공구를 연마하기위하여 고안된 연마장치로 모터에 의해 공작물이 회전하게 되고, 공작물 양측에 자석을 설치하여 자성연마재가 자기장에 의해 고정되게 하였다. 칼럼부분에 갭 센서(Gap sensor)를 설치하여 주축이 상하로 움직이게 하였다. 연마장치에 대한 사양은 Table 1과 같다.

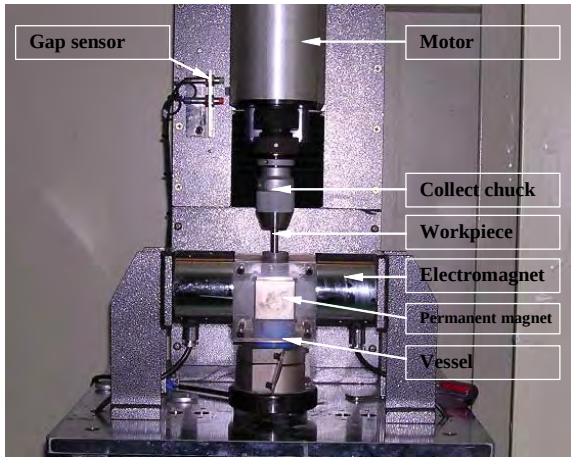


Fig. 3 Photograph of experimental equipment

Table 1 Specification of experimental equipments

Items	Specification
Motor	AC Servo 1800rpm
Magnet	Electromagnet(0~0.2Tesla) Permanent magnet(Nd-Fe-B, 0.6T)
Roughness tester	SV-624(Mitutoyo)
Tesla meter	TM-601(Kanetec)
Power meter	WT130(Yokogawa)
Microscope	MF1030TH(Mitutoyo)

2.2 실험방법

고속절삭공구의 표면조도를 개선하여 공구성능을 향상시키기 위해 먼저 제작된 자기연마장치의 연마특성을 분석하기 위하여 실제 고속절삭공구(엔드밀)의 제작에 사용되는 초경합금 중실봉으로 연마조건에 따른 연마면 거칠기를 평가하는 선행실험을 수행하였다. 선행실험을 통하여 초경합금의 연마에 적

합한 연마조건을 선정하여 고속절삭공구의 연마에 활용하였다.

제작된 자기연마장치의 연마특성은 자속밀도, 연마입자의 크기, 자성입자와 연마입자의 배합률, 연마속도, 연마시간 등 연마조건에 따른 공작물의 표면거칠기를 측정하여 평가하였고 사용된 공작물은 길이 120mm, 직경 ϕ10mm인 중실봉으로 실제 엔드밀 제작에 사용되는 K30재종 경도는 HRc74이다. 자성입자는 Lord사의 제품을 사용하였고, 연마입자는 GC #60, #100, #180, #320과 다이아몬드 #800, #1500, #3000, #8000을 사용하였다. 자성입자와 연마입자의 배합률은 무게비로 25, 40, 50, 57%로 배합하여 실험하였다. 주축의 회전수는 450, 750, 1050, 1350rpm으로 하였다. 전자석의 자속밀도는 0, 0.1, 0.2, 0.6Tesla로 설정하여 실험하였고, 자속밀도의 가변을 위해 전자석과 영구자석을 사용하였다.

Table 2 Experimental Conditions

Items	Conditions
Workpiece	Cemented carbide(K30, HRc74)
Ferromagnetic	241ES,132AD,122-2ED,336AG
Magnetic flux density	0, 0.1, 0.2, 0.6T(gap 35mm)
Abrasive grain	GC #60, 100, 180, 320 Diamond #800,1500,3000,8000
Composition ratio of abrasive grain	25, 40, 50, 57wt%
Rotational speed	450, 750, 1050, 1350rpm
Vibration	0.15Hz, 10mm(amplitude)

3. 연마조건에 따른 연마력의 변화

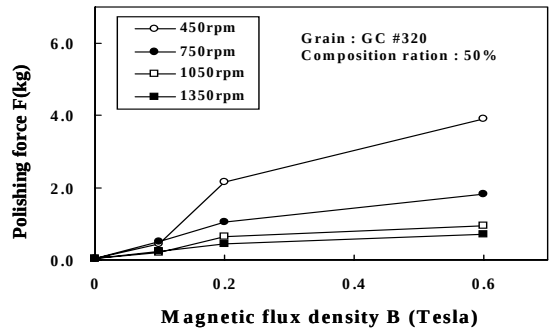
3.1 연마력의 측정

연마입자와 공작물 사이에 작용하는 연마력은 연마성능에 직결되는 요소이다. 자기연마장치는 직접적으로 공작물에 연마력을 가하는 형태가 아니라, 자성연마재의 점도변화에 따라 연마력을 가하는 방식이므로, 자속밀도의 세기와 연마조건에 따른 연마력의 크기를 고찰할 필요가 있다.

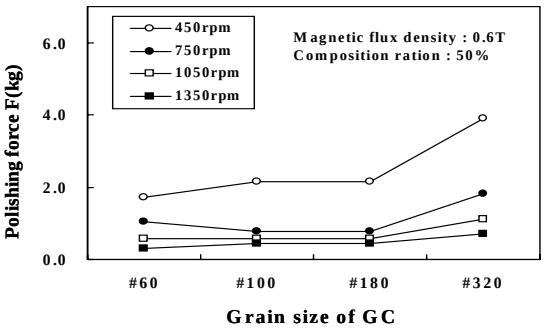
자기연마장치에서 연마력은 모터의 소비동력을 측정하여 연마력을 계산하는 방식으로 측정하였다. 모터의 소비동력은 파워메터(WT130, Yokogawa)로 측정하였고, 소비동력으로부터 연마력의 계산은 아래식과 같다. 여기서, P는 순 소비동력, F는 연마력, V는 공작물 회전속도이다.

$$P(kW) = \frac{F(kg)\times V(m/\min)}{60\times 102(kg\cdot m/\sec)}$$

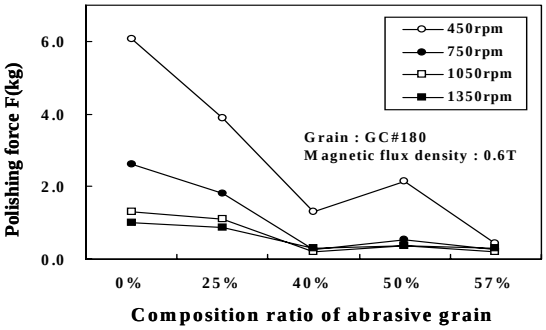
$$\therefore F(kg) = \frac{P(kW)\times 60\times 102(kg\cdot m/\sec)}{V(m/\min)}$$



(a) Magnetic flux density



(b) Grain size of GC



(c) Composition ratio of abrasive grain

Fig. 4 Relationship between polishing conditions and polishing force

3.2 연마력의 변화

자속밀도, 연마입자의 크기, 배합률, 연마속도에 따른 모터의 소비동력을 측정하여, Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 자속밀도에 따른 연마력의 변화를 나타낸 그림으로 자속밀도가 커짐에 따라 자성입자간의 결합력이 커지고, 자성연마재의 점도가 커지므로 자속밀도가 커질수록 연마력이 커지는 것은 당연한 현상이다. Fig. 4(b)는 연마입자의 크기에 따른 연마력을 나타낸 그림으로 연마입자가 작을수록 공

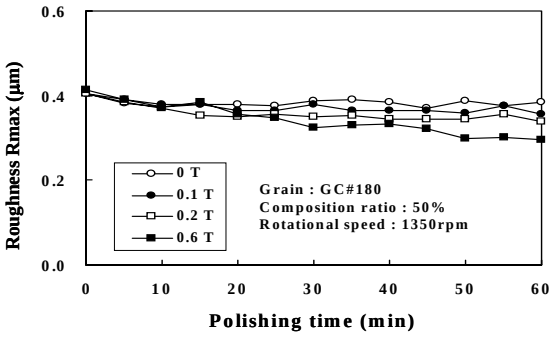
작물에 작용하는 연마입자의 수가 많아지므로 연마력이 크게 나타난다. Fig. 4(c)는 연마입자의 배합률에 따른 연마력의 변화를 나타낸 그림으로 자성입자로만 구성된 경우는 자성입자간의 결합을 방해하는 요소가 없어 자성입자와 공작물의 마찰력이 크게 작용하므로 연마력이 큰 것으로 나타났다. 연마입자의 배합률이 커질수록 연마입자가 자성입자 체인에 불순물로 작용하여 결합력은 저하시키지만, 공작물에 작용하는 연마입자의 수가 많아짐에 따라 공작물에 압입되는 연마입자수가 증가하여 연마력은 증가하게 된다. 이러한 결과로 배합률 50%인 경우가 배합률 40%인 경우보다 연마력이 크게 나타났으며, 배합률 57%인 경우에는 연마입자에 의한 연마력 증가보다 자성입자의 결합력 저하가 크기 때문에 배합률 50%인 경우보다 연마력이 작게 되었다.

4. 연마조건에 따른 연마면 거칠기의 변화

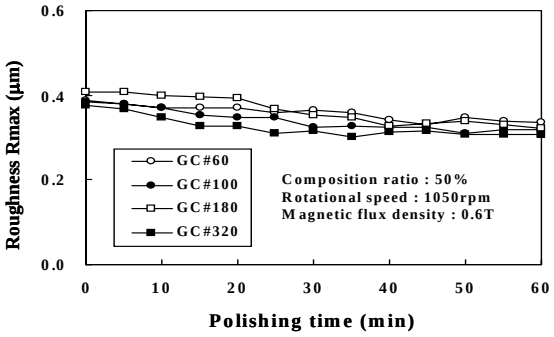
4.1 GC입자에 의한 연마

고속절삭공구의 성능향상을 위한 선행실험으로 초경합금의 자기연마에 적합한 연마조건 선정을 위해 먼저 GC입자를 연마입자로 하여 연마조건에 따른 연마면 거칠기의 변화를 관찰하였다.

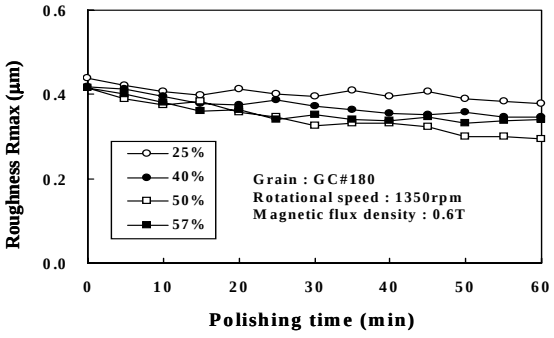
Fig. 5(a)는 GC #180 연마입자로 배합률 50%, 연마속도 1350rpm, 자속밀도를 0, 0.1, 0.2, 0.6Tesla로 하여 연마시간에 따른 연마면 거칠기를 나타낸 그림이다. 그림과 같이 자속밀도가 클수록 연마면 거칠기의 향상이 크게 나타나는데, 이는 자속밀도가 클수록 연마력이 크게 작용하기 때문이다. Fig. 5(b)는 배합률 50%, 연마속도 1050rpm, 자속밀도 0.6Tesla, 연마입자의 크기 #60, #100, #180, #320에 대하여 연마시간에 따른 연마면 거칠기를 나타낸 그림이다. Fig. 4(b)와 같이 연마입자의 크기가 작을수록 연마력이 크게 작용하므로, #180, #320인 경우에 연마면 거칠기의 향상이 크게 나타났다. Fig. 5(c)는 배합률에 따른 연마면 거칠기를 나타낸 그림으로 연마입자 GC #180, 연마속도 1350rpm, 자속밀도 0.6Tesla, 배합률을 25%, 40%, 50%, 57%로 하여 실험한 결과이다. Fig. 4(c)와 같이 배합률 25%일때 연마력이 가장 큰 것으로 나타났지만 공작물을 연마하는 입자의 수가 가장 적기 때문에 연마면 거칠기의 향상은 안 좋게 나타났다. 그러나 배합률 50%는 40%, 57%보다 연마력도 크고, 연마에 관여하는 연마입자의 수도 일정 수준 이상이므로 연마면 거칠기의 향상정도가 가장 좋았다. Fig. 5(d)는 연마입자 GC#320, 배합률 50%, 자속밀도 0.6Tesla, 연마속도가 각각 450rpm, 750rpm, 1050rpm, 1350rpm일때 연마시간에 따른 연마면 거칠기를 나타낸 그림이다. 공작물의 초기표면 거칠기가



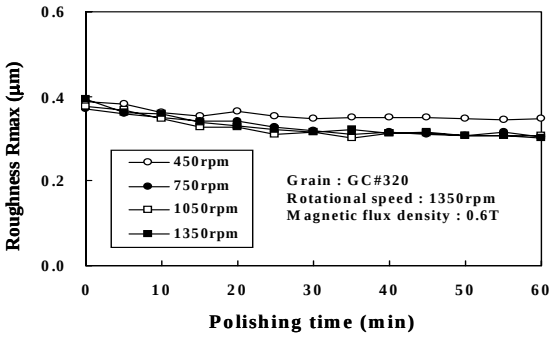
(a) Magnetic flux density



(b) Grain size



(c) Composition ratio of abrasive grain



(d) Polishing revolution

Fig. 5 Relationship between polishing conditions and surface roughness(GC)

1350rpm이 가장 거칠었으나, 최종 연마면 거칠기는 750rpm, 1050rpm, 1350rpm이 서로 비슷한 값을 나타내고 있다. 따라서 연마속도 1350rpm일때 연마면 거치기의 향상이 크다. 따라서 연마조건에 따른 연마면 거칠기의 변화를 알아본 결과 자속밀도 0.6Tesla, 연마입자의 크기 #180, #320, 배합률 50%, 연마속도 1350rpm의 조건으로 연마할 경우, 연마면 거칠기의 향상정도가 가장 크다고 하겠다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 최적의 연마조건이라 생각되는 자속밀도 0.6Tesla, 연마입자 크기 #180, #320, 배합률 50%, 연마속도는 1350rpm로 하여 연마시간을 240분으로 하여 연마시간에 따른 연마면 거칠기를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는바와 같이 GC입자로 240분을 연마하여도 표면 거칠기가 Rmax 0.2㎛이하로는 개선되지 않는 것으로 나타났으며, 이는 GC입자로 초경합금을 자기연마하여 표면 거칠기를 향상시키는 것은 경제성이 없다고 판단된다.

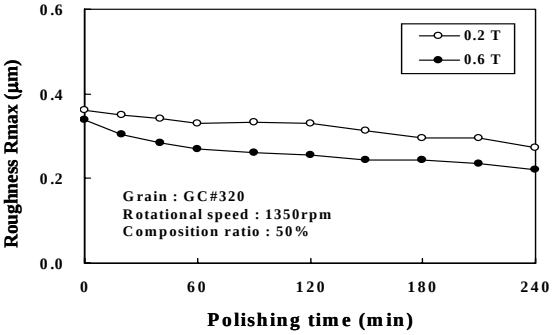
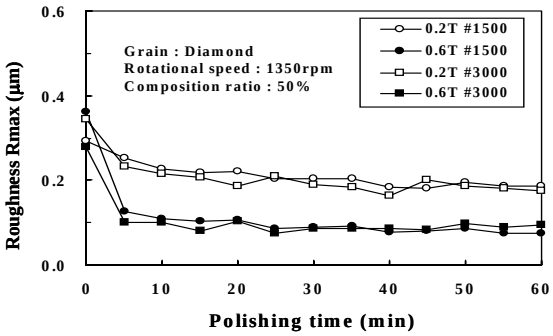


Fig. 6 Relationship between polishing time and surface roughness

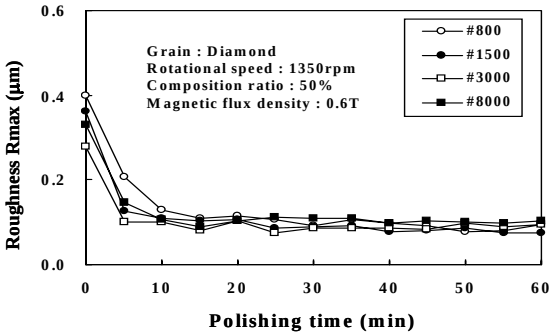
4.2 다이아몬드입자에 의한 연마

GC입자로 자기연마한 경우 표면 거칠기의 향상은 기대할 수 있으나 경제성이 없으므로, GC입자보다 경한 다이아몬드입자를 사용하여 초경합금을 자기연마하여 연마조건에 따른 연마면 거칠기를 관찰하였다.

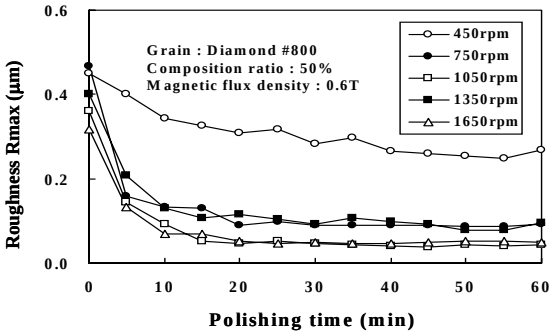
Fig. 7(a)는 연마입자를 다이아몬드 #1500, #3000, 배합률 50%, 연마속도 1350rpm, 자속밀도 0.2, 0.6T로 하여 연마실험을 수행한 결과이다. 그림에서 자속밀도가 0.6T일 때 연마면 거칠기의 향상이 크게 나타났으며, 이는 GC입자와 같은 경향을 보여주고 있다. Fig. 7(b)는 연마입자의 크기에 따른 연마면 거칠기를 나타낸 그림으로 연마입자크기 #800, #1500, #3000, #8000으로 연마실험을 하였다. GC입자의 경우에는 입자크기에 따라 연마면 거칠기의 향상정도가 달랐으나, 다이아몬드입자로 연마한 경우에는 입자의 크기에 따른 연마면 거칠기의 변화는 적었다. 이는 다이아몬드입자의 경도 때문이기도 하지만, 사



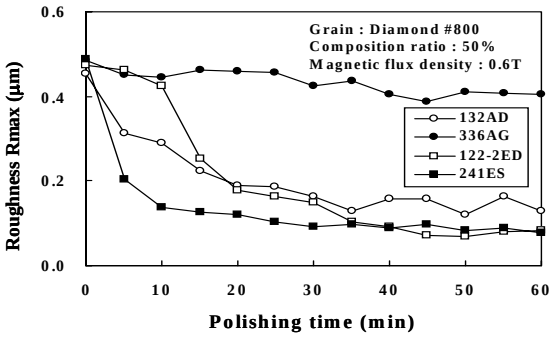
(a) Magnetic flux density



(b) Grain size



(c) Polishing revolution



(d) Magnetic fluid

Fig. 7 Relationship between polishing conditions and surface roughness(Diamond)

용된 다이아몬드 입자의 크기가 #800이상으로 공작물에 작용한 입자의 수가 일정이상이므로 이러한 결과를 나타냈다고 생각된다. Fig. 7(c)는 연마속도를 450, 750, 1050, 1350, 1650rpm, 자속밀도 0.6T, 배합률 50%, 다이아몬드 #800으로 연마한 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 연마속도가 1050, 1650rpm일 때 연마면 거칠기가 좋게 나타났는데, 연마속도가 작으면 연마력은 크게 작용하나 공작물의 회전량은 적게 되고, 연마속도가 크면 연마력은 작으나, 회전량은 크게 되는 등 연마속도에 따라 연마력과 회전량의 상관관계에 의해 이러한 결과가 나타났다. Fig. 7(d)는 자성유체의 종류에 따른 연마면 거칠기를 나타낸 그림이다. 그림에서 132AD와 122-2ED는 하이드로가본(Hydrocarbon)을 336AG는 실리콘(Silicone)을 241ES는 물(Water)을 기본유체로 하여 자성입자를 분산시킨 자성유체이다. 실험결과 물을 기본유체로 하는 241ES가 가장 좋은 연마특성을 나타냈는데, 이는 기본유체의 점성이 높으면 기본유체가 연마입자의 공작물 접촉을 방해하기 때문이라 생각된다.

4.3 입자의 종류에 연마결과 비교

고속절삭공구 소재로 사용되는 초경합금 중실봉을 공작물로 하여 GC입자와 다이아몬드입자로 연마한 후의 공작물의 표면 거칠기와 표면사진을 Fig. 8에 나타냈었다. 그림과 같이 GC입자로 연마한 경우에는 7.5시간을 연마하여도 연마표면은 매우 거친 반면에 다이아몬드입자로 연마한 경우는 1시간의 연마로 연마표면이 매우 평활하고 연마면 거칠기도 매우 좋게 나타났다. 따라서 초경합금의 자기연마는 다이아몬드입자로 연마하는 것이 적합하다고 생각된다.

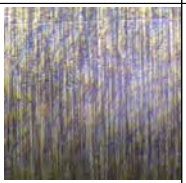
Non polish	GC #320	Dia #1500
		
Ry 0.359㎛	Ry 0.193㎛ 7.5 hour	Ry 0.130㎛ 1 hour

Fig. 8 Photograph of polished plane(x100)

5. 고속절삭공구의 자기연마 및 성능평가

5.1 고속절삭공구의 자기연마

초경 중실봉을 공작물로 하여 GC입자와 다이아몬드입자로 자기연마한 실험결과를 평가하여 고속절삭공구를 연마조건을 Table 3과 같이 선정하였다. 연마입자는 표면 거칠기 향상이 뛰어난 다이아몬드입자로 하였으며, 다이아몬드입자의 크기는 표면 거칠기에 큰 영향이 없으므로 공구의 날손상 고려하여 입자크기는 #8000으로 결정하였다. 자성유체는 241ES, 배합률은 50%, 자속밀도는 0.6T로 결정하였다. 회전속도는 공작물의 형상을 고려하여 복잡한 형상의 공구 전 표면에 연마력이 작용할 수 있도록 1050rpm으로 결정하였다.

Table 3과 같은 연마조건으로 고속절삭공구를 연마시간과 회전방향과 공구의 상하운동의 유무에 따라 60-polish와 30-polish로 구분하여 제작하였으며, 생산조건으로 Table 4와 같다. 이러한 연마조건과 생산조건으로 하여 제작된 고속절삭공구를 Fig. 9에 나타내었다.

Table 3 Polishing conditions of cutting tools

Items	Conditions
Grain	Diamond #8000
Ferro-fluid	241ES
Composition ratio	50%
Magnetic flux density	0.6 Tesla
Rotational speed	1050rpm
Z-axis oscillation	10mm
Endmill	Cemented carbide φ10 4-plat

Table 4 Product conditions of cutting tools

	Non-polish	60-polish	30-polish
Polishing times	-	60min	30min
Rotation direction	-	CW	CW
Up-down oscillation	-	×	O

Fig. 9 Polished high speed cutting tools

5.2 고속절삭공구의 성능평가

자기연마장치로 절삭공구의 표면 거칠기를 향상시킨 공구의 성능평가를 위해 절삭력과 공구마모를 측정하여 평가하였다.

실험장치는 3축MCT를 이용하였고, 공작물은 열

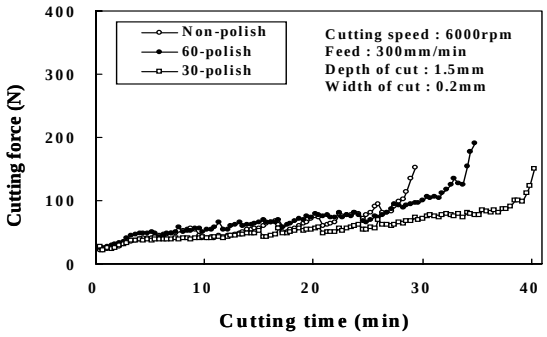
처리하지 않은 STD11을 사용하였다. 절삭시의 절삭력은 공구동력계로 측정하였으며, 공구마모는 공구현미경으로 관찰하였다. 실험장치 사진은 Fig. 11에 실험장치 사양은 Table 5에 나타내었다.

절삭공구는 연마하지 않은 공구(Non-polish), 공구를 상하로 운동하지 않고 60분 연마한 공구(60-polish), 상하로 운동하면서 30분 연마한 공구(30-polish) 3종에 대해 성능을 평가하였으며, 실험결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)는 절삭시간에 따른 절삭력 변화를 나타낸 그림으로 연마하지 않은 공구는 27분을 전후하여 절삭력이 급격히 증가하였고, 60분 연마한 공구는 35분, 30분 연마한 공구는 40분경에 절삭력이 급격히 증가하였다. 이렇게 절삭력이 급격히 증가하는 것은 공구마모가 일정수준이상으로 진전하여 공구수명의 한계점에 도달했기 때문에 발생하는 현상으로, Fig. 10(c)의 공구마모를 공구현미경으로 관찰한 그림에서 연마하지 않은 공구가 연마한 공구에 비해 공구마모가 극심함을 보여주고 있다. Fig. 10(b)는 절삭시간에 따른 공구마모를 나타낸 그림으로 동일한 공구마모(0.2mm)에 도달할 때까지의 절삭시간이 30분 연마한 공구가 연마하지 않은 공구에 비해 공구수명이 10분 이상 향상됐음을 보여주고 있다.

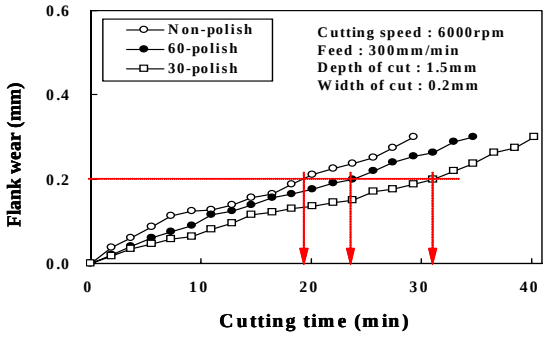
Fig. 10 Experimental equipment for performance estimation of high speed cutting tool

Table 5 Experimental equipments

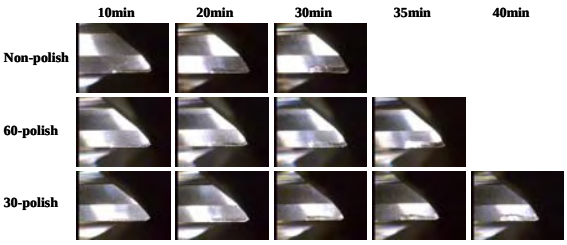
Items	Specifications
MCT	Sirius-2(Hwacheon)
Workpiece	STD11(Non Heat treatment)
Tool dynamometer	9257B(Kistler)
Microscope	MF1020TH(Mitutoyo)



(a) Cutting force



(b) Flank wear



(c) Photograph of flank wear(x50)

Fig. 10 Performance estimation of high speed cutting tool

6. 결론

고속절삭공구의 성능향상을 위해 자기연마장치로 절삭공구 표면을 연마하였으며, 자기연마한 절삭공구의 성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 자기연마장치의 연마조건에 따른 연마력을 측정한 결과, 자속밀도는 클수록, 연마입자는 작을수록, 배합률은 50%일때 연마력이 크게 나타났다.

2. GC입자를 연마입자로 초경합금을 연마한 결과, 초경합금의 자기연마에는 적합하지 않은 것으로 나타났다.

3. 다이아몬드 입자를 연마입자로 초경합금을 자기연마한 결과, 자속밀도는 0.6Tesla, 연마속도는 1050rpm과 1650rpm에서 양호한 연마면 거칠기를 얻을 수 있었으며, 입자크기가 연마면 거칠기에 미치는 영향은 적었다. 자성유체의 기본유체는 되도록 점성이 없는 것을 사용하는 것이 연마면 거칠기 향상에 좋은 것으로 나타났다.

4. GC입자와 다이아몬드입자로 초경 중실봉을 대상으로 자기연마한 결과를 바탕으로 고속절삭공구를 자기연마한 결과, 표면이 개선된 고속절삭공구를 제작할 수 있었다.

5. 자기연마한 절삭공구의 성능을 절삭력과 공구수명으로 평가한 결과, 30분간 상하로 움직이면서 연마한 공구가 연마하지 않은 공구에 비해 공구수명이 50%이상 향상된 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 지식기반기계 부품 · 소재연구개발 클러스터사업단의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 고성림, 이상규, 배승민, “엔드밀의 형상설계에 관한 연구”, 한국정밀공학회지 제18권, 제8호, pp.24-31, 2001.
2. 김홍규, 서정태, 권정현, 김정석, 강명창, “초미립 초경소재 개발을 통한 엔드밀 공구의 성능평가”, 한국정밀공학회 2001년도 추계학술대회논문집, pp.300-304, 2001.
3. Patricia L. Smith, "A new finishing process significantly lengthens the life of cutting tools and other wear products," American Machinist, November, 1999.
4. 川久保英樹 外 人 單純混合型磁性硏磨材の 硏磨性能に する 硏究 日本機械學會論文集 編 65卷 号 pp. 386-393, 1999.
5. 山本豊壽 外 人 偏肉円管内面の の硏究 日本機械學會論文集 編 卷 号 pp. 173-178, 1992.
6. 進村武男 山口ひとみ による 滑加工に する 硏究 日本機械學會論文集 編 卷 560号 pp. 293-299, 1993.
7. 山口ひとみ による の平滑加工に する 硏究 第 報 日本機械學會論文集 編 卷 号 pp. 307-313, 1994.
8. 박성률 외 3명, “자기연마기술을 이용한 고속절삭공구의 성능향상에 관한 연구,” 한국정밀공학회 2005년도 춘계학술대회논문집, 2005.
9. W. I. KORDONSKI and D. GOLINI, "Fundamentals of Magnetorheological Fluid Utilization in High Precision Finishing," Journal of IMSS, Vol. 10, pp. 683-689, 1999.
10. 進村武男 山口ひとみ による け い ファイソセラミックス 日本精密工學會誌 Vol. 67, No. 12, 2001.