

초경 엔드밀의 플라즈마 이온 주입과 저온 열처리를 통한 내마멸성 향상

강성기*, 왕덕현+, 김원일**

(논문접수일 2010. 8. 6, 심사완료일 2010. 11. 14)

Enhancement of Wear Resistance by Low Heat Treatment and the Plasma Source Ion Implantation of Tungsten Carbide Tool

Seong-Ki Kang*, Duck-Hyun Wang+, Won-Il Kim**

Abstract

In this research, nitrogen plasma source ion implantation(PSII) of non-coated tungsten carbide endmill tools was conducted with low heat treatment for increasing wear resistance. After the low heat treatment of PSIIed tools to give a homogeneity of wear resistance, the surface modification of tools was analyzed by hardness test, surface roughness and cutting forces. As for the resultant cutting forces, low heat treatment in temperature of 400°C and 500°C is stable because of low cutting resistance. The 20-minutes heat treated tool at spindle speed 25000rpm has superiority of surface roughness, Ra of 0.420 μ m and was found to have good wear resistance. The higher hardness value was obtained by increasing temperature from 300°C to 600°C for PSIIed tools with low heat treatment. As the PSIIed tools under 10minutes at temperature of 600°C have the highest hardness as Hv of 2349.8, It was analyzed that temperature processing give much influences on hardness.

Key Words : High Speed Machining(고속가공), Binding Energy(결합에너지), Plasma Source Ion Implantation(플라즈마 이온 주입: PSII), Electron Spectroscopy for Chemical Analysis(전자 분광 화학분석법: ESCA)

1. 서론

고속 정밀 가공에서 사용되는 기존의 WC-Co 초경합금은 경도가 높은 육방정의 결정 구조를 가지는 WC상에 연성이 우수한 Co가 결합제로 첨가된 형태로 우수한 내마멸성을 가지고 있다. 하지만 가공기술 및 소재의 발달로 인해 더욱더 내마멸성을 갖는 공구 개발이 요구되며, 최근에는 초경합금의 모재에

경질의 세라믹(Al_2O_3)을 단층 또는 다층 피복하여 초경합금이 가지는 기존의 인성에 경한 피복 물질의 내마멸성을 동시에 실현시킨 공구를 개발하여 사용하고 있지만 사용 시간의 증가에 따라 점차 코팅 막의 벗겨짐으로 인하여 가공물의 표면 조도에 영향을 주어 기계적 성질 및 고품질을 얻는데 어려움을 갖고 있다⁽¹⁾.

이온 주입법은 Schockley⁽²⁾에 의해 소개되어 실용화된 분

* 한국폴리텍 VII대학 창원캠퍼스 컴퓨터응용기계설계학과
+ 경남대학교 기계자동화공학부 (dhwang@kyungnam.ac.kr)
주소: 631-701 경남 창원시 마산합포구 월영동449번지
++ 경남대학교 기계자동화공학부

야로 반도체 불순물 Doping 공정을 제외하고 그리 넓지 못한 편이었으나 1980년대 Conrad⁽³⁾와 Los Alamos Nation Lab 등을 중심으로 꾸준한 연구로 금속 표면의 특성을 개선시킬 수 있는 탁월한 방법으로 인식되었다^(4~5).

플라즈마 이온 주입(plasma source ion implantation: PSII) 기술은 소재 표면의 내마멸성, 내식성, 내피로성, 마찰 특성, 열적 안정 등 향상시키는데 큰 효과를 나타내고 있다. 일반적으로 질소(N₂) 이온을 주입하면 마멸에 대한 저항성이 증가되어 공구의 수명을 향상시킬 수 있다고 알려져 있으며 현재 초경합금 공구에 질소를 플라즈마 이온 주입하여 마멸 저항을 높여 공구의 수명을 향상시키는 것으로 연구되고 있다⁽⁶⁾.

일반적으로 절삭가공에서 공구와 피삭재는 경도 차이에 따라 공구의 수명이 달라지며, 공구의 경도를 일정하게 하였을 때 피삭재의 경도가 높아지면, 상대적으로 공구의 경도가 저하되어 공구 날 끝의 마멸로 소성 변형되어 날 끝의 결손이 일어나는 경향이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 플라즈마 이온 주입한 공구를 저온 열처리하여 공구에 인성과 재질의 균질화, 안정화를 가질 수 있도록 하고, 내마멸성을 높여 공구수명을 향상시키고자 하였다. 또한 신뢰성을 높이기 위해 절삭력 분석, 가공면의 표면조도 분석, 공구 경도 측정 및 공구 표면 개질에 따른 성분의 물성 변화와 특성에 대하여 연구하였다.

2. 플라즈마 쉬스 이론

플라즈마 이온 주입이 이루어지는 동안 마이너스의 고전압 펄스가 소재에 인가되어 주위에 플라즈마 쉬스(sheath)가 형성되고 소재 표면에 이온들이 가속 된다. 쉬스의 크기는 초기 플라즈마 밀도, 인가전압, 펄스의 지속시간에 의해 결정 된다⁽⁷⁾.

정상상태(steady state)에서 쉬스의 두께는 Child-Langmuir 의 법칙에 따라 다음 식 (1)과 같이 표현 된다.

$$S = \frac{\sqrt{2}}{3} \lambda_{De} \left\{ \frac{2V_o}{T_e} \right\}^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

T_e 는 Volts 단위로 전자 온도, λ_{De} 는 전자의 Debye length, V_o 는 인가전압을 나타낸다.

전류 밀도(current density) J_c 는 다음 식 (2)와 같다.

$$J_c = \frac{4}{9} \epsilon_o \left\{ \frac{2e}{M} \right\}^{\frac{1}{2}} \times \frac{V_o^{\frac{3}{2}}}{S^2} \quad (2)$$

ϵ_o 는 진공에서의 유전율(permittivity), e 와 M 은 전하량(charge)

과 질량이다. 사용 가능한 변수들 중 플라즈마 밀도 $n_e=5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $T_e=3\text{eV}$, 인가전압 $V_o=50\text{keV}$ 로 가정하고 전자의 Debye 길이가 $\lambda_{De}=0.6\text{mm}$ 라고하면, 이때 쉬스의 두께는 88cm가 된다. 펄스 대신 직류 고전압을 표적에 가한 경우 플라즈마의 쉬스가 평형상태에 도달하게 되고, 쉬스 두께가 너무 커져 플라즈마 용기가 대형이 필요하게 된다. 기초 실험 연구를 통하여 2개 이상의 표적 재료를 삽입할 경우 간격이 40mm 이하인 경우 쉬스의 간섭 현상으로 이온 주입이 어렵게 되며, 이러한 현상을 피하기 위해 표적 재료의 이격 거리를 40mm~80mm 정도로 배치하여 이온 주입을 한 경우, 이온 주입 층이 150nm 깊이까지 주입이 되어 본 연구에서는 간격을 40mm 이상으로 하여 이온 주입 후 공구의 물성 변화를 분석하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 질소 플라즈마 이온 주입과 저온 열처리

Fig. 1은 플라즈마 이온 주입 실험 장치의 개략도로서 이온 주입에 사용된 공구는 $\phi 3\text{mm}$, 2날 비 코팅 초경 엔드밀로 샘플 스테지에 41.35mm, 50mm, 60mm, 88.3mm의 공구 간격을 두고 위치시켜, 진공 챔버 내의 중심축에 정확히 고정하였다.

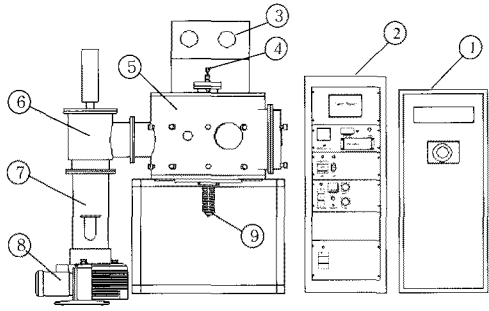
플라즈마 발생기와 이온주입 공구사이 10mm 위에 그리드 망을 설치한 후, 챔버의 문을 닫고, 배출 밸브를 5~10분 정도 동작시켜, 진공 상태로 한 후 로터리 펌프와 확산 펌프(diffusion pump), 히터를 이용하여 저 진공(2×10^{-3} Torr), 고 진공(2×10^{-5} Torr) 상태로 만든다. 고 진공이 완료되면 질소 가스(gauge pressure: $2 \sim 3\text{kg/cm}^2$)를 주입한다.

RF(radio frequency)를 작동시켜 파워를 350W까지 천천히 증가시키고, 약 40분경과 후 챔버 내의 색깔을 확인하고, 플라즈마가 충분히 생성되었으면 고전압 발생장치를 가동시키는데, 이때 실험조건에서 인가전압은 35kV, 주파수 500Hz, 펄스 폭 2 μs 에서 6시간 동안 플라즈마 이온 주입이 되도록 한다.

특히, 실험에 사용된 미니 튜브 로(QT1200-H50)는 이온 주입이 완료된 공구에 Ar 분위기속에서 분당 약 5°C~6°C 정도 씩 온도를 상승시키면서, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C의 4가지 조건에서 열처리 온도 시간 10min, 20min, 30min 3가지 조건에 맞도록 등온 유지시켜, 총 12가지의 조건에서 저온 열처리 한 후, 노냉(6시간 냉각)시켜 이온 주입 공구가 가지고 있는 표면 개질 상태를 통하여 공구의 인성과 공구의 수명을 향상시키도록 하였다.

3.2 고속 절삭가공 및 측정

Fig. 2는 고속 가공용 초경 엔드밀($\phi 3\text{mm}$)에 플라즈마 이온을 주입한 후, 저온 열처리를 마친 공구를 이용하여 내마멸성과 절삭성을 알아보기 위한 절삭 가공시 측정 시스템을 나타내고



- 1. Chiller
- 2. High voltage pulse power modulator
- 3. Matching network
- 4. RF feed through
- 5. Chamber
- 6. Main valve
- 7. Diffusion pump
- 8. Oil rotary pump
- 9. Pulse power

Fig. 1 Schematic illustration of plasma source ion implantation (PSII) equipment

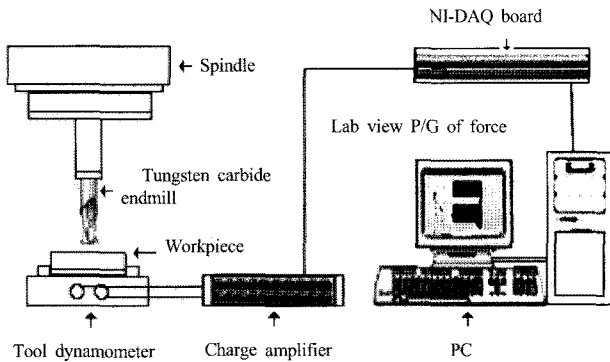


Fig. 2 Schematic illustration of high speed machining process

있으며, 공구마멸 상태를 파악하기 위하여 고속 가공기(Okada GM544)에 압전 소자형 공구 동력계(Kistler, 9257BA)를 부착하고 공구 동력계에서 얻어진 절삭력 신호는 다채널 증폭기 DAQ Board를 거쳐 내장된 A/D 변환기에서 터미널을 통해 PC에 저장하여 절삭 3분력(Fx, Fy, Fz)을 측정 분석하도록 하였다.

절삭가공 조건은 Table 1에 나타내고 있으며, 실험에 사용된 소재는 STD11(금형공구강), 규격은 30×60×25mm인 직육면체를 CATIA S/W로 모델링한 후 가공 조건을 부여하여, 1차 모의가공을 실시한 NC 데이터로 초경 엔드밀 $\varnothing 3\text{mm}$ 로 1회 가공 시 1.5mm 폭으로 겹치게 하면서 바깥에서 안쪽으로 총 12회 걸쳐 절삭하도록 하고, 이때 절삭유는 사용하지 않았다. 특히 사용된 공구는 인가전압 35kV 6시간 플라즈마 이온 주입 후, 저온 열처리하여 총 48개를 실험에 사용하였다.

조도형상 측정기(SV-C3000H4/Mitutoyo)로 Fig. 3과 같이 가공 방향과 직각 방향인 면 네 곳의 방향에서 중심선 평균 거칠기(R_a)를 각 3회씩 측정하여 평균한 값을 측정 데이터로 사

Table 1 Experimental conditions for high speed machining

Workpiece	Spindle speed (rpm)	Feed rate (mm/min)	Depth of cut (mm)
STD11	10000	3500	0.2
	17000		
	25000		

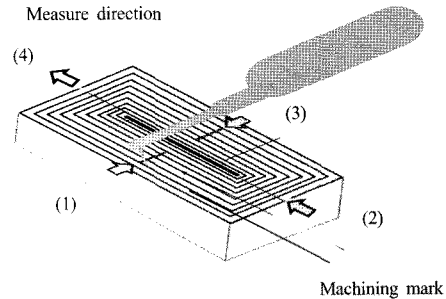


Fig. 3 The measurement direction of surface roughness

용 하였다.

마이크로 비커스 경도시험기(MXT-Alpha 7E)를 이용하여 이온 주입 후 온도 300℃, 400℃, 500℃, 600℃에서 등온 시간 10min, 20min, 30min의 12가지 조건의 저온 열처리한 공구의 밑면($\varnothing 6\text{mm}$)을 10mm 정도 절단하고, 0.5mm 간격으로 10곳의 부위에 경도를 측정하도록 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 절삭력 분석

Fig. 4에서 절삭 합력을 10min, 20min, 30min의 등온 시간과 300℃, 400℃, 500℃, 600℃ 온도와 관계를 분석한 결과 10min에서 열처리온도 500℃, 600℃와 20min에서 400℃, 500℃, 600℃의 주축회전수 10000, 17000, 25000rpm에서 절삭력이 비교적 낮게 나타나 안정적인 가공이 이루어졌으며, 부분적으로 절삭 분력이 급격히 변화하는 것은 기계 자체의 진동과 외부에서 전달되는 에너지와의 영향을 가진 것으로 분석된다.

특히, 온도 조건에 따라 20min간 열처리한 공구에서 비교적 낮은 절삭 저항으로 가공에서 안정적인 가공 조건을 가지는 것으로 나타났다.

열처리온도 30min에서는 주축회전수가 17000, 25000rpm의 절삭 저항이 비교적 낮았으며, 저속 절삭일수록 절삭 저항이 크게 나타났는데, 이것은 열처리 온도와 시간 및 공구의 경도 변화에 따른 영향을 미친다고 유추할 수 있다.

절삭 합력은 3가지 조건에서 평균적으로 주축 회전수가 높을수록 적어지는 모습을 보이고 있으며, 각 온도별 데이터 분석에서 20min 정도 등온을 유지하는 것이 이상적인 모습을 보여주

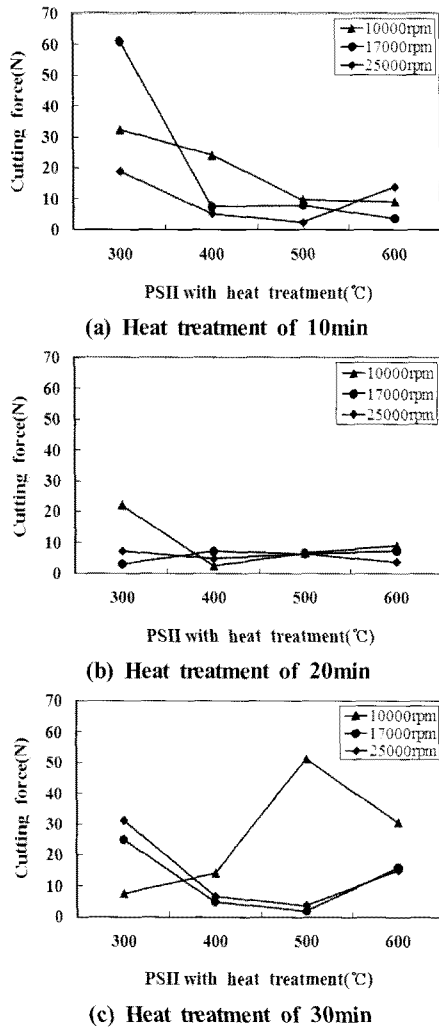


Fig. 4 Cutting force results for different heat treatment conditions after PSIIed

고 있다. 또한, 주축 회전수는 25000rpm에서 등온 시간20min 정도에서 좋은 결과를 가지는 것으로 나타났다.

4.2 표면 조도 측정 분석

Fig. 5는 WC-Co 공구의 이온 주입 얇은 상태와 이온 주입한 공구 및 이온 주입 후, 열처리한 공구에 대하여 주축회전수 10000rpm, 17000rpm, 25000rpm에서 절삭 가공 후, 표면 조도를 측정된 값을 비교하여 나타내고 있으며, 주축회전수 10000 rpm의 저속 가공 보다는 25000rpm의 고속가공으로 갈수록 표면 조도의 값이 향상되는 것을 알 수 있었고, 특히, 20min에서 등온 열처리하여 25000rpm으로 고속 가공한 시험편에서 표면 조도가 가장 좋은 결과를 나타내고 있다.

4.3 경도 시험 및 표면 성분 분석

Fig. 6에서는 플라즈마 후 열처리 온도 300°C, 400°C, 500°C,

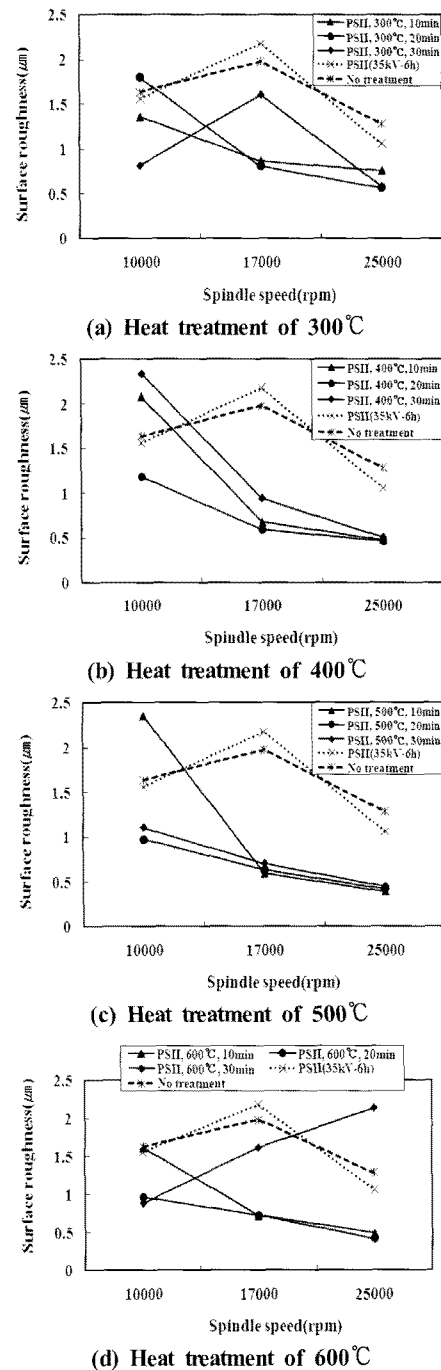


Fig. 5 Surface roughness results for different heat treatment conditions

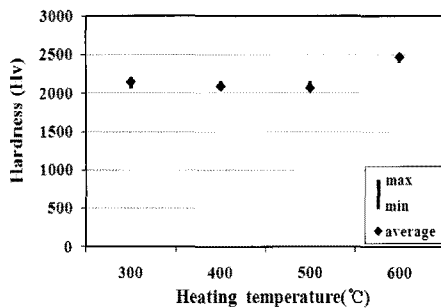
600°C에서 10min, 20min, 30min의 12가지 조건으로 등온 유지한 공구를 10회씩 정도 시험하여, 측정의 신뢰성을 높이기 위하여 측정값 중 가장 높게 측정된 값과 가장 낮게 측정된 측정값은 데이터 값으로 사용하지 않고 나머지 값을 합산하여 평균한 데이터 값을 비교하여 나타내고 있다.

(a),(b),(c)에서 보는바와 같이 열처리 온도 300°C와 600°C에서 열처리 시간에 관계없이 경도 값이 높게 나타내고 있으며,

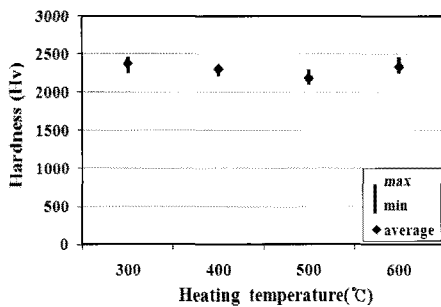
특히 열처리 온도 600°C에서 열처리 시간 10min한 공구가 평균 경도 값이 Hv 2,349.8로 가장 높게 나타났고, 20min, 30min 동안 열처리한 공구에서도 비교적 경도 값이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

따라서 공구 조건별 경도 시험에서 무 처리한 공구에서는 Hv 1867.42 이었으나, 인가전압 35kV 조건에서 이온 주입 6시간한 공구에서는 Hv 1954.2로 높았으며, 이온 주입(35kV 6시간) 후, 온도 600°C에서 10min간 열처리한 공구에서의 경도 값은 Hv 2349.8, 20min에서는 Hv 2309, 30min은 Hv 2191.85로 비교적 열처리한 공구에서 높은 경도 값을 가지고 있었다.

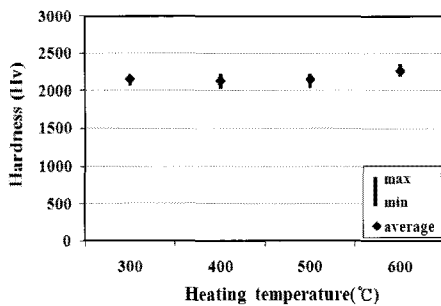
Fig. 7과 Fig. 8은 소재 표면을 전자 분광 화학 분석법(electron spectroscopy for chemical analysis :ESCA)으로 분석한 것으로, WC-Co의 이온 주입하지 않은 상태에서 나타나지 않던 N의 성분(이런 경우는 성분의 농도가 0.1% 이하가 되면 노이즈에 가려서 식별하기가 어려워진다.)이 이온 주입 후, 열처리한 공구에서 잘 나타내고 있으며, W와 Co 성분은 약간의 차이는



(a) Heat treatment of 10min



(b) Heat treatment of 20min



(c) Heat treatment of 30min

Fig. 6 Micro vickers hardness values for different heat treatment conditions

있지만 거의 비슷한 값을 가지고 있었었다. Cu와 Ni 등의 불순물은 고전압 발생 시 플라즈마 상태의 이온이 표적 재료와 샘플 스테이지 및 고압 케이블에 동시에 충돌하면서 원자들이 표적 재료에 달라붙어 발생하는 현상으로 보인다.

Fig. 9에서는 이온 주입 않은 공구와 이온 주입 후, 저온 열처리한 공구를 1초당 0.1nm씩 100초간(10nm) 식각하여, 각 구성 성분을 측정된 값을 나타내고 있으며, Count/s는 광전자가 검출되는 Count 수이고, 바인더 에너지는 결합 에너지로 어떤 원소의 주위 환경이 달라지면 결합에너지 역시 바뀌게 된다. 따라서 어떤 원소 주위에 어떤 원소와 결합하였는가 하는 것에 따라 값이 다르게 나타나게 된다.

(a)에서 N은 397eV 부근에서 피크가 크게 나타나 이온 주입과 열처리에 대한 N의 효과가 있는 것으로 나타났으며, (b)에서는 이온 주입 않은 공구의 W는 결합에너지가 낮을수록 피크가 높게 나타났고, 결합에너지가 30eV~35eV에서 피크의 이동이 일어났는데 이 현상은 같은 종류의 원자들이라도 그 원자들이 처해 있는 화학적 환경이 다르게 되면 이들의 결합에너지가 조금씩 달라지는 현상을 의미하며, 결합에너지가 낮을수록 W 성분이 나타나고 결합에너지가 높을수록 산화가 빠르게 일어나 WO₃로 나타나고 있는 것이다.

(c)에서 Co는 결합 에너지 778eV~780eV에서 이온 주입 않은 공구의 피크가 낮게 나타났으며, (d)에서 C는 결합에너지와 Counts의 피크에서 비슷한 결과를 가지고 있었으나 이온 주입과 열처리에 대한 효과가 다소 높게 나타났다.

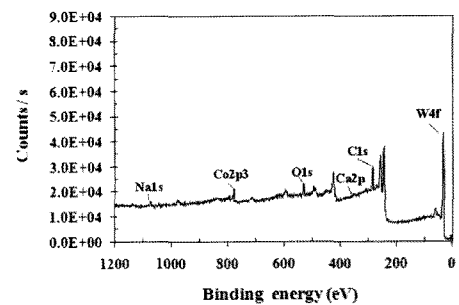


Fig. 7 ESCA survey scan spectrum of non-treatment

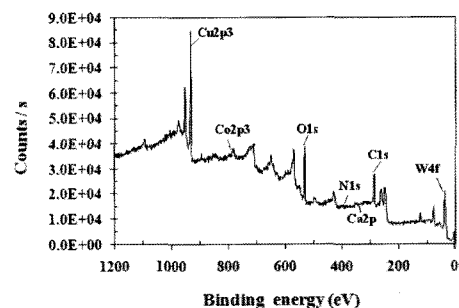


Fig. 8 ESCA survey scan spectrum of PSIIed tungsten carbide with heat treatment

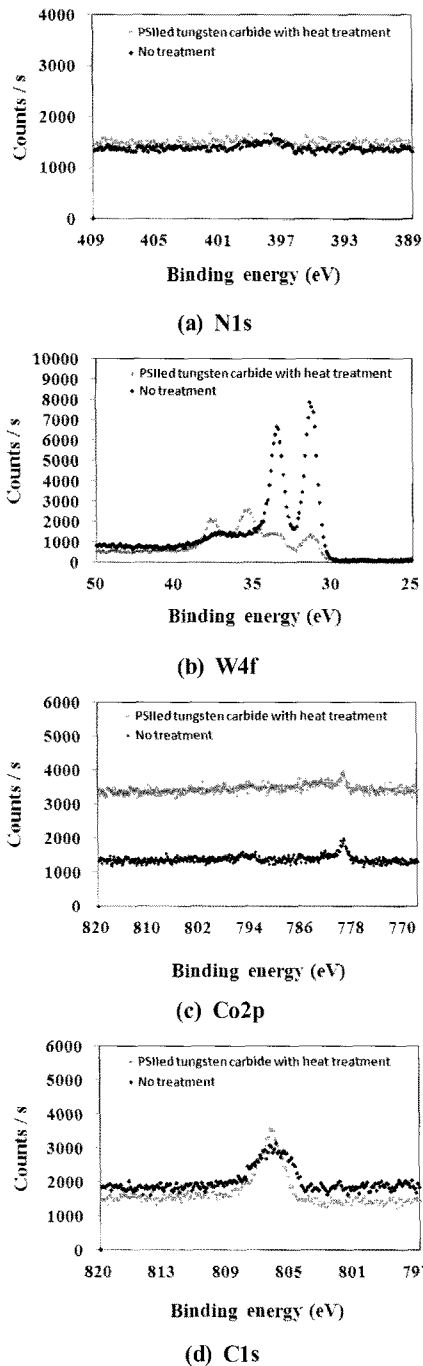


Fig. 9 Component Analysis of tool surface

5. 결론

표면 개질을 통하여 내마멸성을 갖는 공구를 개발하고자 일 반 비 코팅 초경엔드밀($\varnothing 3\text{mm}$) 공구에 질소를 플라즈마 이온 화하여 주입하고 다시 이온 주입된 공구를 저온 열처리한 후 성분의 물성 변화와 가공 절삭력, 표면 조도, 경도시험을 통하 여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭 합력에서는 400℃, 500℃, 600℃에서 저온 열처리 하는 것이 절삭 저항을 적게 받아 안정적인 상태를 보였고 고속가공에서는 주축회전수 25000rpm에서 10min, 20min, 30min 동안 등온 후 노냉(6시간 이상)시킨 공구 중 20min 등온 열처리한 공구가 표면 조도에서 0.420 μm 으로 우수한 값을 나타내어 공구의 날 끝 마멸이 적게 일어나 내마멸성 이 우수한 것으로 분석되었다.
- (2) WC-Co(non-treatment) 공구와 이온 주입한 공구, 이온 주입 후 저온 열처리한 공구의 경도시험에서 300℃에서 600℃로 온도가 증가 할수록 경도 값이 조금씩 높게 나 타났으며, 열처리 온도 600℃에서 10min간 등온을 유지 하며 저온 열처리한 공구의 경도 값이 Hv 2349.8로 가 장 높게 나타나 열처리가 경도에 영향을 주는 것으로 나 타났다.
- (3) 플라즈마 이온 주입한 공구의 표면에는 W, N, Co, C, O의성분이 확인되었고, 이온 주입 않은 공구에서는 나 타나지 않았던 질소는 300℃ 온도에서 10min 열처리한 조건에서 결합에너지 397.72에서 피크를 나타내어 이온 주입과 열처리에 대한 N의 효과가 있는 것으로 나타났 으며, Cu와 Ni의 불순물도 다소 보였는데, 이것은 Cu의 경우 케이블에서, Ni은 샘플 스테지에서 발생한 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 2010년도 경남대학교 학술연구 장려금 지원에 의 해 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Kim, D. H., Kim, J. S., Woo, Y. W., and Lee, H. H., 2007, "A Study on the Performance Evaluation of End Mill Tool Fabricated by Ultra-Fine WC," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 1~8.
- (2) Schockley, W., 1957, *Forming Semiconductive Devices by Ionic Bombardment*, U.S Patent: 2787564.
- (3) Conrad, J. R., Radke, J. L., Dood, R. A., Worzala, F. J., and Tran, N. C., 1987, "Plasma Source Ion Implantation Technique for Surface Modification of Materials," *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, No. 11, pp. 4591~4596.
- (4) Masamune, S., and Yukimura, K., 2006, "Transient Ion Sheath in Pulsed Plasma," *IEEE Trans. Plasma Science*, Vol. 34, No. 4, pp. 1195~1198.

- (5) Ueda, M., Berni, L. A., and Castro, R. M., 2005, "Application of Plasma Immersion Ion Implantation for Improved Performance of Tools and Industrial Components," *Surface and coating Technology*, Vol. 200, Issue. 1, pp. 515~520.
- (6) Bae, H. J., and Park, H. S., 2004, "Analysis of Working Factors for Improvement of Surface Roughness on High Speed End-Milling," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 52~59.
- (7) Munson, C. P., Cluggish, B., Wood, B., and Walter, K., 1997-1998, "Plasma Source Ion Implantation Research, Development, and Applications," *LANL Progress report*, pp. 122~131.