

〈論 文〉

다이아몬드 촉침의 이온 스파터 가공조건에 관한 연구

한응교* · 노병옥** · 김병우***

(1990년 6월 5일 접수)

A Study on the Machining Condition of Diamond Stylus Using Ion Sputter Machining

Eung Kyo Han, Byung Ok Rho and Byung Woo Kim

Key Words : Ion Sputter Machining(이온스파터 가공), Diamond Stylus(다이아몬드 촉침) Tip Radius Prediction(선단반경예측), Optimal Machining Condition(최적가공조건), Variation of Tip Radius(선단반경변화)

Abstract

There are requirement of surface roughness in mechanical elements that has minute surface of several nm degree. When high precision surface roughness measurement is made with stylus type surface roughness measuring apparatus, measuring accuracy depend on the tip radius of diamond stylus. Therefore, ultra precision machining was accomplished using ion sputter machining in order to machining the stylus tip radius less than $0.5\mu\text{m}$, which is impossible through lapping machining. In this study, optimal machining condition for the ion sputter machining was obtained through the experiment under the various varing machinbing quantity and condition of diamond stylus. And as the result of applying this optimal condition, the good result was obtained that machining probability of stylus tip radius less than $0.5\mu\text{m}$ is 93%.

1. 서 론

기계가공된 표면의 요철정도, 즉 표면거칠기는 기계부품의 접촉부강성, 고체 접촉부의 전열^(1,2) 등을 해석하는데 있어 중요하다. 이러한 표면거칠기를 측정하기 위한 방식⁽³⁾은 촉침법, 광절단법, 광파간섭법, 반사광분포법, 전기용량법등이 있으며 이 중에서 가장 많이 쓰이며 기본적인 측정법이 촉침식 측정법이다⁽⁴⁾. 종래, 표면거칠기 측정용의 다이아몬드 촉침의 가공은 다이아몬드 미분말과 연질

래프판에 의한 기계적연마에 의해 가공되어져왔으나 근년, 가공기술의 향상에 따른 정밀기계부품의 고성능화, 고정밀도화에 발맞춰 nm의 단위를 갖는 표면거칠기 측정이 요구되고 $1\mu\text{m}$ 이하의 미세선단반경을 갖는 촉침이 필요하게 되었다. 그러나, 기계적인 연마에 의해 미세한 선단형상을 가공하려면 선단부에 결함이 생기기 쉽고 공업적으로 그 제작에는 많은 어려움이 따른다. 대개 기계적인 방법으로써의 촉침제작은 $2\mu\text{m}$ 의 선단반경을 갖는 촉침의 가공이 공업적 한계이다⁽⁵⁾. 이에 대하여 이온스파터 가공은^(6~8) 소재에 가까운 형상의 가공을 할 수 있으며 비임조사시간 및 전류 밀도등의 가공파라미터를 제어함으로써 임의의 선단반경의 촉침을 가공할 수 있다. 다이아몬드 촉침의 이온스파터

* 정회원, 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

** 정회원, 한양대학교 대학원

*** 한양대학교 대학원

가공은 宮本岩男⁽⁹⁾, Spencer⁽¹⁰⁾ 등에 의해 연구되어져 왔지만 주로 가공시간에 따른 가공량 측면에 주안점을 두고 연구하였다. 촉침의 이온스파터 가공된 형상은 다이아몬드 촉침의 초기형상, 선단반경, 이온에너지, 가공시간, 이온입사각도 등에 의존하기 때문에⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 전류밀도와 가공시간을 변화시켰을 때의 가공량, 가공상태를 검토해 보았으며, 촉침홀더의 가공각도를 달리하거나 재부착문제를 해결하기 위한 마스크의 사용여부에 따른 촉침의 가공상태를 알아보기 위해 초기선단반경 2 μm , 선단각 90°의 다이아몬드 촉침을 이온스파터 가공기를 사용하고, 가공조건을 변화시켜서 초정밀 가공품의 표면거칠기 측정에 적합한 0.5 μm 이하의 미세한 선단반경을 갖는 촉침을 가공하기 위한 가공조건에 대한 실험을 하였다.

2. 이온스파터 가공되는 다이아몬드 촉침의 선단반경 예측법

다이아몬드촉침의 선단반경은 이온스파터 가공의 진행에 따라 감소된다. 따라서, 촉침의 선단형상을 직접 근사하여 선단반경을 구하는 방법(예측법 I) 및 촉침선단부위 각부에 있어서 곡률반경을 직접 계산하여 선단의 평균반경을 구하는 방법(예측법 II)의 두가지 방법을 이용하여 이온스파터 가공된 촉침의 선단반경의 예측을 하였다. 여기서 가공된 촉침의 선단반경의 예측은 다음과 같은 가정하에서 행하였다.

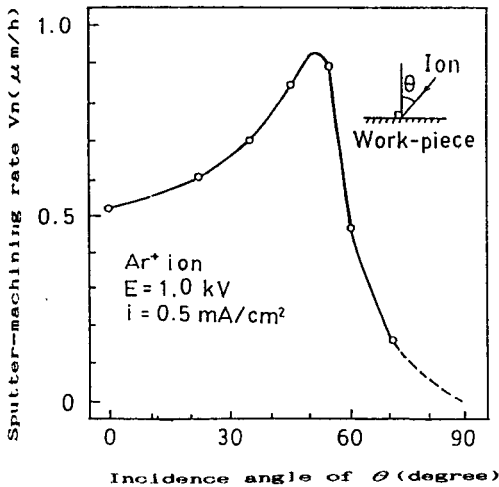


Fig. 1 Incidence angle dependence of sputter machining rate

(1) 다이아몬드촉침의 이온스파터 가공속도 $V(\theta)$ 는 이온입사각 θ 의 함수로서 Fig. 1과 같은 小坂 연구소⁽²¹⁾에서 실험적으로 구한 것을 이용하였다. 실제로 선단반경을 예측할 때는 이 곡선을 함수적으로 표시해야 하기 때문에 이 곡선을 4개로 분할해서 각각의 곡선에 대해서 최소자승법을 이용하여 근사식을 만든다.

(i) $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$

$$V_1(\theta) = 1.749 \times 10^{-4} \times \theta^2 - 3.847 \times 10^{-4} \times \theta + 0.5271 \quad (1)$$

(ii) $45^\circ < \theta \leq 52.5^\circ$

$$V_2(\theta) = -3.049 \times 10^{-3} \times \theta^2 + 0.3046 \times \theta - 6.669 \quad (2)$$

(iii) $52.5^\circ < \theta \leq 62.5^\circ$

$$V_3(\theta) = 2.726 \times 10^{-3} \times \theta^2 - 0.3788 \times \theta + 13.36 \quad (3)$$

(iv) $62.54^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

$$V_4(\theta) = 4.332 \times 10^{-4} \times \theta^2 - 7.768 \times 10^{-2} \times \theta + 3.489 \quad (4)$$

(2) 다이아몬드 촉침은 2차원적 형상으로 근사시킬 수 있다.

(3) 곡선상의 어떤 점에 있어서 접선은 이온스파터 가공의 진행에 따라 평행으로 가공된다.

(4) 재부착 등의 2차적인 영향은 무시한다.

2.1 촉침의 선단반경 예측법 I

다이아몬드 촉침의 선단형상을 Fig. 2에 나타내었다. 이것은 3차원 물체를 2차원으로 표시한 것으로 선단형상은 x, y 좌표의 y 축에 관하여 대칭이다. 직선 AQ 는 점 Q 에 있어서, 직선 BP 는 점

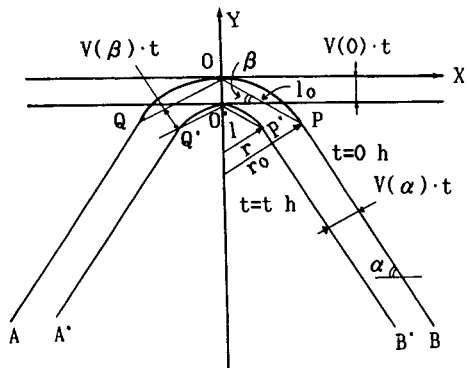


Fig. 2 Straight-line approximation of the diamond stylus(2-dimension view)

P에 있어서 호 QOP(원의일부)에 접하고 있다. 여기서 다이아몬드축침의 선단형상은 직선 \overline{AQ} , \overline{QO} , \overline{OP} 및 \overline{PB} 로 근사시키고, 가정한 것과 같이 선단형상을 나타내는 직선이 스파터 가공에 의해 그 자신에 평행하게 가공된다고 하면 t시간의 가공에 의한 축침의 형상은 A' Q' O' P' B'와 같이 된다. 이때 직선 $\overline{O'P'}$ 의 길이 l은 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$l = l_0 - \frac{1}{\sin(\alpha - \beta)} \left\{ V(\alpha) - \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} V(\beta) \right\} \cdot t \quad (5)$$

여기서 α 및 β 는 직선 $\overline{PB'}$, $\overline{O'P'}$ 와 x축이 이루는 각, l_0 는 직선 \overline{OP} 의 길이이다. 또한 Fig. 2에서 알 수 있듯이 $l_0 = 2r_0 \sin(\alpha/2)$, $l = 2r \sin(\alpha/2)$, $\beta = \alpha/2$ 이 되므로 이온스파터 가공시간 t와 축침의 선단반경 r과는 식 (6)과 같은 관계가 성립한다.

$$r = r_0 = \frac{1}{1 - \cos \alpha} \left\{ V(\alpha) - \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha/2)} V(\alpha/2) \right\} \cdot t \quad (6)$$

2.2 축침의 선단 반경 예측법 II

Docomun⁽¹²⁾에 의하면 다이아몬드 축침의 선단 부근의 곡선 c_0 상의 한점 $p_0(x_0, y_0)$ 는 Fig. 3에 있는 것과 같이 t시간의 스파터가공에 의해 곡선 c상의 한점 $p(x, y)$ 로 변화하고 점 P의 좌표는 식 (7)로 부터 구할 수 있다.

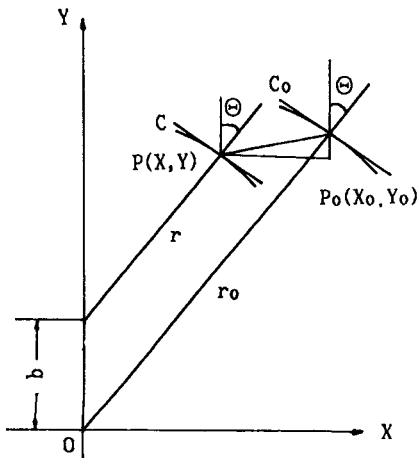


Fig. 3 Prediction of the tip radius of the sputter machined diamond stylus

$$x = x_0 - \left\{ \frac{dV(\theta)}{d\theta} \cos \theta + V(\theta) \sin \theta \right\} t \quad (7)$$

$$y = y_0 + \left\{ \frac{dV(\theta)}{d\theta} \sin \theta - V(\theta) \cos \theta \right\} t$$

또 이온입사각 θ^0 에 있어서 이온스파터 가공속도 $V(\theta)$ 는⁽¹³⁾

$$V(\theta) = V_0(1 + A \sin^2 \theta) \sec \theta \quad (8)$$

로 주어지며 여기에서 Fig. 1의 다이아몬드축침의 이온스파터 가공속도 $V(\theta)$ 의 데이터에서 식 (8)을 적용하면 $V_0 = 0.52 \mu\text{m/hr}$, $A = 0.36$ 을 얻는다. 또한 식 (8)을 θ 로 미분함으로써 $dV(\theta)/d\theta$ 는 식 (9)와 같이 주어진다.

$$\frac{dV(\theta)}{d(\theta)} = V_0 \{ (1+A) \sec \theta \tan \theta + A \sin \theta \} \quad (9)$$

식 (8), (9)를 식 (7)에 대입하면

$$x = x_0 - 2(1+A) V_0 t \tan \theta \quad (10)$$

$$y = y_0 + V_0 \{ (1+A) \tan^2 \theta - 1 \} t \quad (11)$$

여기에서 $x_0 = r_0 \sin \theta$, $x = r \sin \theta$ 이므로 식 (10)은 식 (12)와 같이 된다.

$$r = r_0 - 2(1+A) V_0 \sec \theta t \quad (12)$$

따라서 축침의 선단반경의 평균치 \bar{r} 은 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{r} = r_0 - 2(1+A) V_0 \int_0^{\alpha} \sec \theta d\theta \quad (13)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

(1) 이온 스파터 가공장치

이온 스파터 가공장치는 그 사용목적과 이온빔의 발생방식에 따라 여러가지가 있지만⁽¹⁴⁾ 본 실험에서는 이온충격에 의한 제거가공을 목적으로 하고 있고 또한 이온전류를 안정적으로 공급할 필요가 있기 때문에 이온에너지가 최대 2KeV인 Kaufman형 가공장치를 사용하였다. 본 실험장치는 Fig. 4에서와 같이 진공배기장치, 이온원, 가공실, 가공대, 가스도입계, 조작전원계로 구성되어 있으며 진공배기장치는 저진공용의 유희전 진공펌프, 고진공용의 유확산 진공펌프로 구성되어 있다. 이온원은 한번에 많은 축침을 가공함으로써 가공효율을 높이기 위해서 $\phi 65\text{mm}$ 의 Broad형을 사용하였다. 가공대는 Fig. 5에 나타나 있듯이 균일한 가공을 할 수 있게끔 자전 및 공전이 동시에 이루어지는 구조로 되어 있으며 공전은 12rpm, 자전은 48rpm으로 회전시켰다. 또한 이온빔에 대하여 축침의 셋팅각도

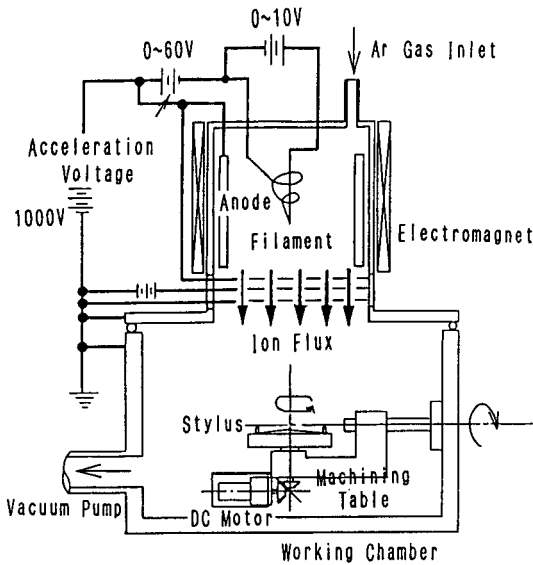
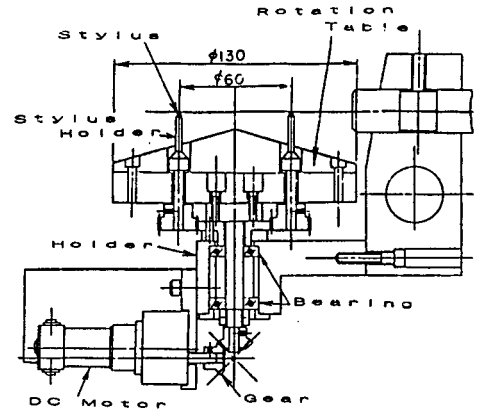
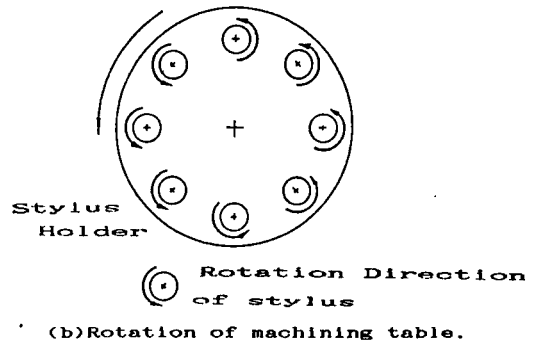


Fig. 4 Ion sputter machining apparatus (Inside system)

를 조정할 필요성에서, 회전테이블의 축심에 대해 직각방향으로 회전축을 설치하여 그 회전축을 중심으로 가공대를 회전시킬 수 있는 구조로 되어 있다. Fig. 6은 이온스파터 가공기의 전체외관을 보이고 있다. 먼저 이온원실내를 $6-8 \times 10^{-6}$ Torr까지 배기시킨 후에 Ar가스를 주입구의 밸브를 통하여 주입시켜 8×10^{-5} Torr정도가 되게한다. 그리고 조작전원의 Anode 전압을 70V, 이온인출전압을 1000V로 하고 필라멘트에 전류 7A를 부여하면 필라멘트가 가열되어 열전자를 방출한다. 이 열전자가 아노드에 인가된 전압에 의하여 가속되고 아노드 외부에 설치된 전자석에 의해 와류운동을 하면서 Ar가스와 충돌한다. 이때 열전자가 갖고 있는 운동에너지가 Ar가스원자의 이온화 에너지보다 클 때 Ar원자는 이온화되어 Ar^+ 이온이 되며 이온원실과 가공실 사이에 있는 3개의 그리드에 의해 인출되어 가공물에 주사됨으로써 가공이 이루어진다. 다이아몬드와 같은 절연물의 이온스파터 가공에 있어서는 Ar^+ 이온의 정전하에 의해서 가공물표면에 재부착 현상이 일어난다. 이것을 방지하기 위해서 일반적으로는 이온중화기가 사용^(15,16)되어지고 있으나, 본 실험에서는 이온충격에 의해서 생기는 가공대에서의 2차전자에 의해 다이아몬드 표면의 정전하가 중화되고 또한 다이아몬드 표면적이 작고 정전하가 방전되기 쉬운 이유⁽¹⁷⁾로 이온중화기는 사

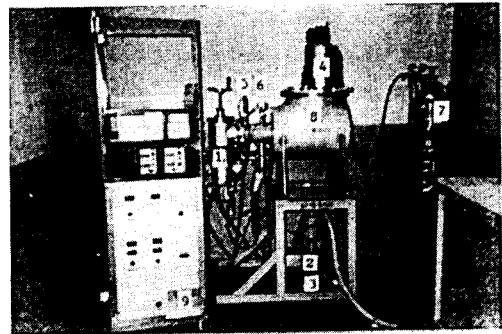


(a)Machining table and stylus holder



(b)Rotation of machining table.

Fig. 5 Machining table



NO	ITEM	MODEL
1	Diffusion pump	D40, Exhaust velocity 570 l/min
2	Rotary pump	C380, Exhaust velocity 360 l/min
3	Motor	NRH3085M, Output 0.75kW
4	Ion source	Ar gas inlet
5	Pirani vacuua gauge	PT-3P Meas. range $1-1 \times 10^{-3}$ Torr
6	Ionization vacuua gauge	IT-3P Meas. range $1 \times 10^{-3}-1 \times 10^{-9}$ Torr
7	Ar gas tank	Purity 99.9999%
8	Machining chamber	SUS304, Vol. 40l
9	Electric supply set	

Fig. 6 Ion sputter machining apparatus

용하지 않았다.

(2) 주사형 전자현미경 (SEM)

이온스파터가공에 의해 가공된 다이아몬드 촉침의 선단형상을 측정하기 위해서 주사형 전자현미경 (이하 SEM)을 사용하였다⁽¹⁸⁾. 종래의 SEM으로는 배율 및 분해능이 떨어지며 또한 광학적 측정방법도 있지만 이 방법은 횡방향의 분해능이 1 μ m밖에 안되기 때문에 본 실험에서는 2차 전자검출기를 갖는 SEM에 컴퓨터를 연결하여 가공된 촉침의 선단형상을 평가하였다. 이 장치는 SEM에 2차 전자검출기(A, B)가 부착되어 있고 각각의 출력의 조합에 의한 상은 시료면에 요철에 특히 민감한 상이 된다. 또 A, B의 출력은 A/D변환기에 의해 컴퓨터분석이 되어 전자빔조사점의 성분분석이 가능하게 된다. 이 측정장치의 분해능은 종방향 2nm, 횡방향 8nm 정도이며 측정원리는 Fig. 7과 같다.

- (i) 시료에 전자빔을 조사하고 조사점에 대해 대칭으로 배치된 2차전자 검출기 A, B가 시료로부터 발생하는 2차전자를 검출한다.
- (ii) 시료의 수평면에 전자를 조사한 경우, 2차 전자는 시료 법선에 대해 대칭한 분포로 발생하기 때문에 검출기 A, B의 신호는 같게 된다.
- (iii) 경사면에서는 경사한 방향으로 분포가 이루어지기 때문에 R에 있어서는 검출기 A의 신

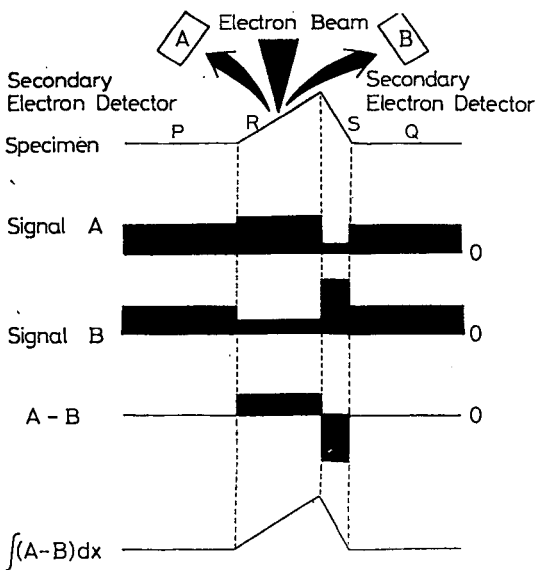


Fig. 7 Principle of SEM apparatus

호가 강하고 S에 있어서는 검출기 B의 신호가 강하게 된다.

- (iv) 두가지 신호의 차 (A-B)를 구하면 그림에 나타난 것처럼 수평면 P, Q에서는 0, 경사면 R, S에서는 (+), (-)의 양으로 되어 시료면의 구배에 대응 하게 된다.
- (v) 따라서 (A-B)를 적분하면 시료의 단면도가 얻어진다.

다음에 Fig. 8과 같이 장치의 동작을 설명한다.

- (i) 전자조사계는 전자빔을 가늘게 교차시켜 시료면에 조사한다.
- (ii) CRT에는 SEM상이 표시된다(여기까지는 통상의 SEM과 동등하다).
- (iii) 연산회로는 두가지의 검출기의 출력의 합 (+) 또는 차(-)의 연산을 행하여 CRT에 보낸다. (+) 신호에 의한 상은 통상의 SEM으로, (-) 신호에 의한 상은 표면의 요철에 민감한 상이 된다.
- (iv) 단면측정을 행할 때는 컴퓨터가 인터페이스를 통해 주사회로를 제어하고 전자빔을 주사한다
- (v) 이때의 신호 A, B는 같은 인터페이스를 통해 컴퓨터로 들어간다.
- (vi) 컴퓨터는 A, B의 신호를 계산하고 단면도를 구해 CRT에 표시한다.

(3) 미세형상측정기

이온스파터가공한 미세선단반경을 갖는 촉침의 선단반경을 측정하기 위해서 미세형상측정기

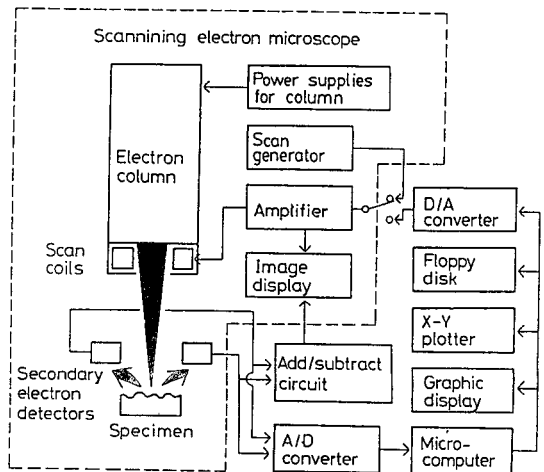


Fig. 8 Schematic diagram of SEM apparatus

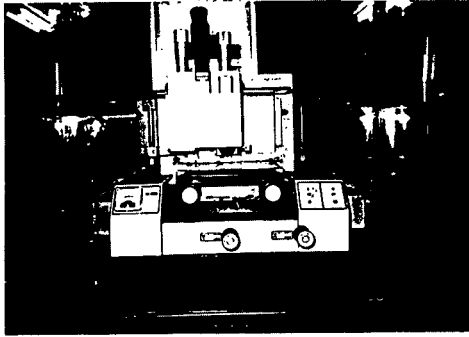
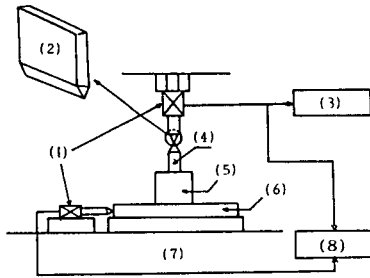


Fig. 9 Minute shape measurement apparatus



1	Displacement Detector	2	Measurement Rule of Knife Edge Type
3	X-T Recorder	4	Diamond Stylus
5	Stylus Holder	6	Traveller
7	Base	8	X-Y Recorder

Fig. 10 Frame of minute shape measurement apparatus

(Kosaka Lab. Ltd., ET-30HK)에 선단반경 0.05 μm 의 나이프에치 촉침을 붙여 선단반경의 형상을 측정하고 얻어진 형상을 템프레이트와 비교하여 가장 가까운 반경을 그 촉침의 선단반경으로 하였다. 측정 배율은 5000~ 1×10^6 배이고 측정 범위는 0.001~12 μm 이며 측정길이는 30mm이다. 미세형상측정기는 조작이 용이하므로 형상측정에 통상 사용되고 있으며 촉침의 선단반경도 비교적 간단히 측정할 수 있다. Fig. 9은 미세형상측정기의 외관이며 Fig. 10은 측정원리를 보이고 있다.

3.2 실험방법

본 실험은 여러가지 가공조건하에서 초기선단반경 2 μm , 선단각 90°의 다이아몬드 촉침을 이온스파터 가공한 후 최적가공조건을 가공상태, 가공량, 재부착물 여부에 따라 평가하였다. 임의의 시간에 서 가공된 촉침의 가공형상은 Fig. 11와 같다.

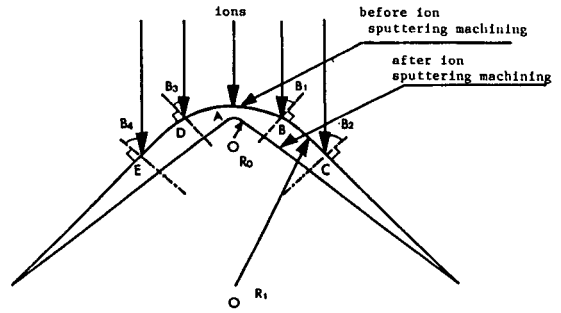


Fig. 11 Machining profile of diamond stylus

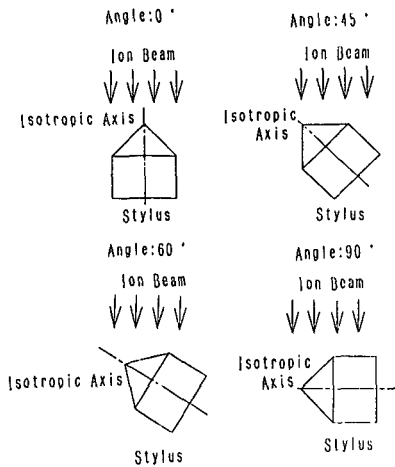
Fig. 11에서도 알 수 있듯이 가공전의 촉침형상과 가공후의 촉침형상은 이온빔이 조사될 때 촉침의 각 위치마다 평탄부와 경사부가 존재하므로 이온입사각이 40°~60°로 추정되는 BC나 DE부분에서 가공속도가 빠르고 A부분에서는 이온입사각이 90°로서 가공속도가 느리게 된다. 이와 같은 경로로 가공된 촉침을 SEM과 미세형상 측정기를 통하여 촉침의 형상 및 선단반경을 측정하고 이를 통하여 최적가공조건을 구한 후 이 최적가공조건하에서 15개의 촉침을 가공하여 선단반경 0.5 μm 이하의 촉침을 가공할 수 있는 가공달성율(해당촉침수/전체촉침수 $\times 100(\%)$)을 구하였다. SEM의 중, 횡배율은 10000배로 측정하였으며 컴퓨터를 통하여 촉침선단에 부착된 재부착물의 재료분석을 함으로써 재부착물성분을 규명하였고 미세형상측정기에서 얻은 촉침의 형상과 SEM으로부터 촬영한 촉침의 형상사진과를 비교하기 위하여 미세형상측정기의 중, 횡배율을 SEM측정배율과 같이하여 측정하였다. 이때의 측정압은 20mgf, 촉침이송속도는 4 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 설정하였다. 세부적인 실험방법은 다음과 같다.

(1) 전류밀도, 가공시간 변화에 따른 촉침선단반경이 변화

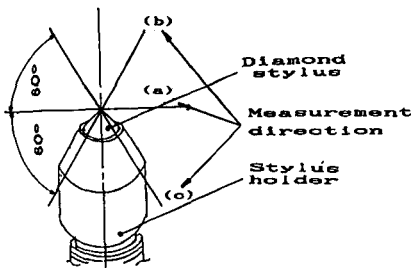
가공된 선단반경이 2 μm 인 다이아몬드 촉침을 이용하여 전류밀도와 가공시간을 변화시키면서 선단반경 변화와 가공량을 조사하였다. 전류밀도를 0.30mA/cm²와 0.38mA/cm²으로 설정하여 각각의 전류밀도에 대해서 가공시간을 달리하여 전류밀도 \times 가공시간에 대한 촉침선단반경의 변화량을 측정하였다.

(2) 촉침홀더의 각도변화에 따른 촉침선단반경의 변화

보통 금속의 스파터를 S(atom/ion)는 이온입사



(a) Setting angle of stylus holder.



(b) Measurement direction of stylus.

Fig. 12 Setting angle of stylus holder and Measurement direction of stylus

각 θ 가 50°에서 60°의 각도에서 최대로 되며 다이아몬드 재질은 이온에너지 1KeV인 경우, θ 가 50° 전후에서 스파터율 S가 최대로 되는 것으로 알려져 있다⁽¹⁹⁾. 따라서 본 실험에서는 촉침홀더의 각도를 변화시키므로써 이온입사각도를 변화시켜 이때의 촉침의 선단반경의 변화량과 촉침의 형상을 측정하였다. 즉 Fig. 12와 같이 촉침 홀더 설정각도를 0°, 45°, 60°, 90°로 변화시키면서 가공을 행하였으며 이때 이온에너지는 1KeV, 전류밀도 0.38mA/cm²에서 5시간씩 가공하였다.

(3) 촉침의 자전 유무에 의한 촉침의 형상비교

촉침의 자전 유무에 의한 촉침의 형상오차를 구명하기 위하여 촉침을 가공대에서 자전시키면서 가공한 경우와 자전시키지 않은 상태에서 가공한 경우에 대해서 Fig. 12(b)와 같이 3방향에서 선단반경을 측정하여 그 차를 구함으로써 촉침선단형상의

가공 균일화를 평가하였다.

(4) 마스크의 유무에 의한 촉침의 가공상태비교

다이아몬드 촉침의 가공속도는 가공대와 가공실 내벽등의 재료에 비하여 느리기 때문에 가공대, 가공실내벽에서 스파터된 원자가 다이아몬드 촉침 표면에 재부착 되어 가공효율을 저하 시키는 요인이 된다. 이 재부착문제는 촉침홀더를 이용함으로써 어느 정도 방지할 수는 있지만 재부착물을 더 없애기 위하여 직경 130mm 정도의 알루미늄 원판 내부에 직경 1.5mm의 8개의 원형마스크를 사용하여 가공한 후 다이아몬드 촉침 선단부분의 재부착물 성분을 SEM에 장착된 컴퓨터를 통해 분석하였으며 또한 마스크의 사용 여부에 따라 촉침의 선단반경 변화량도 측정하였다. 이때의 실험조건은 이온에너지 1KeV, 전류밀도 0.38mA/cm², 촉침을 자전시키면서 가공시간은 5시간으로 가공하였다.

(5) 최적가공조건을 적용한 다이아몬드 촉침가공

여러 조건하에서 가공한 결과로부터 구한 최적가공조건 즉, 이온에너지 1KeV, 전류밀도 0.38mA/cm², 가공시간 5시간, 촉침홀더각도 0°, 마스크를 사용하지 않는 조건하에서, 가공전 촉침의 선단반경 2 μ m, 초기형상 오차량 0.5 μ m이내의 촉침을 15개 가공하여 촉침선단 반경의 탈성률을 구하였으며 가공된 촉침의 선단부 형상을 알아보기 위하여 미세형상측정기와 SEM사진을 통하여 형상을 판별하였다. 또한 촉침의 선단반경 예측법에 의한 선단반경의 변화와 최적가공조건하에서 가공된 촉침의 선단반경 변화를 비교하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 전류밀도, 가공시간에 의한 촉침선단반경 변화

(전류밀도) × (가공시간)에 따른 촉침의 선단반경 변화량을 Fig. 13에, 측정위치와 전류밀도에 따른 촉침의 선단반경 변화량을 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 전류밀도를 0.30mA/cm²와 0.38mA/cm²으로 설정하였을 때 선단반경 변화량은 (전류밀도) × (가공시간)이 1.98mA·hr/cm²까지는 직선적으로 증가하지만 1.98mA·hr/cm²을 정점으로 촉침의 선단반경 변화량이 감소되는 경향을 보이고 있으며, 전류밀도 0.38mA/cm²의 경우가 0.30mA/cm²에 대해서 선단반경 변화량이 0.1 μ m 정도 크게 변화였다. 가공한 촉침의 각 측정방향에

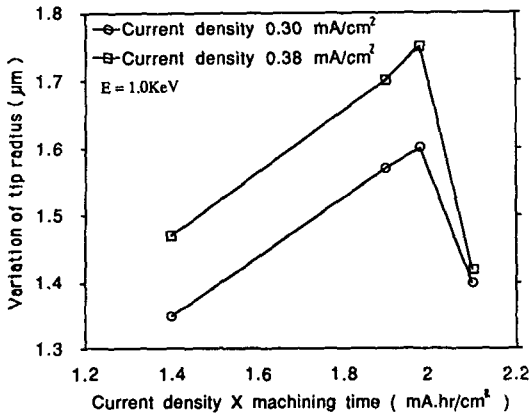


Fig. 13 Relationship between (current density) × (machining time) and variation of tip radius of diamond stylus

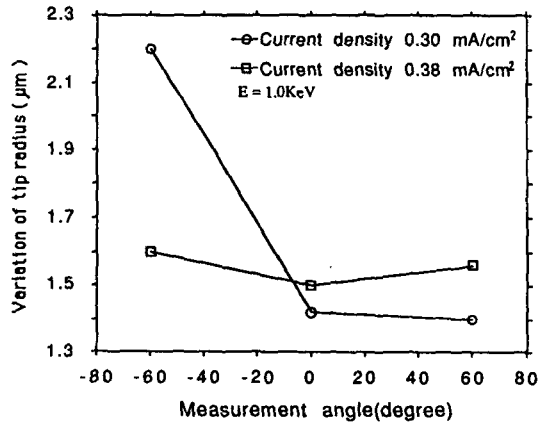


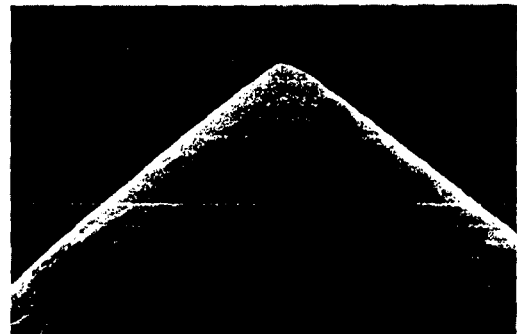
Fig. 14 Tip radius variation of diamond stylus by measurement degree and current density

있어서의 선단반경변화량의 기복은 Fig. 14에서 알 수 있듯이 전류밀도 0.38mA/cm²의 경우가 더 적음을 알 수 있는데 이로부터 가공시 전류밀도 0.38 mA/cm²로 설정하여 가공하면 균일한 가공을 할 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 15은 전류밀도 변화

에 따른 측침의 형상을 SEM 사진 및 미세형상측정기로 측정한 결과를 보이고 있다. 미세형상측정기로 측정한 결과, 전류밀도 값에 따라 측침선단형상의 변화 차는 거의 없었지만 SEM사진에 의한 측침선단부의 불순물 부착은 전류밀도 0.30mA/



(a) Current density 0.30mA/cm², t=3.7hr (SEM)



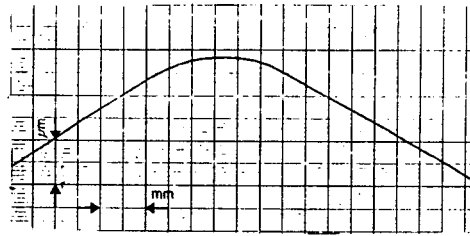
(c) Current density 0.38mA/cm², t=3.7hr (SEM)



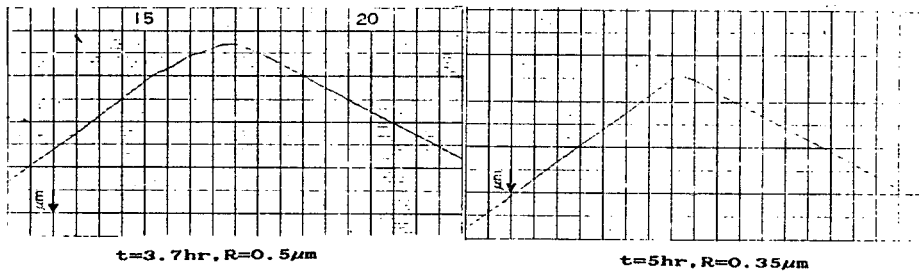
(b) Current density 0.30mA/cm², t=5hr (SEM)



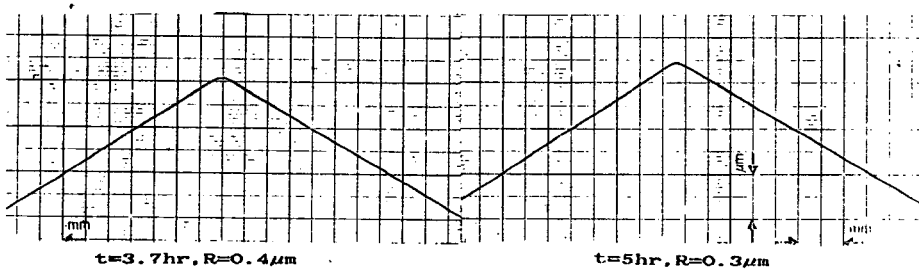
(d) Current density 0.38mA/cm², t=5hr (SEM)



(a) Before machined stylus, $R=2\mu m$



(b) Current density $0.30\text{mA}/\text{cm}^2$



(c) Current density $0.38\text{mA}/\text{cm}^2$

Fig. 15 E.T and SEM photo of the ion sputter machined diamond stylus

cm^2 의 경우에 많은 불순물이 부착되어 있음을 알 수 있었다. 전류밀도값이 적정값인 경우 전하축적 현상이 일어나지 않으므로⁽⁹⁾ 촉침선단부에 불순물이 적게 부착되는 점과 촉침선단 가공량의 결과로부터 전류밀도는 $0.38\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 5시간 가공이 최적전류밀도 값과 가공시간이라고 여겨진다.

4.2 촉침홀더의 각도변화에 의한 촉침선단 반경의 변화

Fig. 16으로부터, 촉침홀더의 설정각도를 이온빔의 조사방향에 대해 변화시켰을 경우 홀더각도 0° 일 때가 촉침선단반경 변화량이 가장크고 홀더각도 60° 일 때에 급격한 감소 하고 있다. 이는 다이아몬드의 결정축이 60° 이므로 결정축 방향으로 홀더각도 설정시에는 가공이 어렵게 되는 것을 보여주는

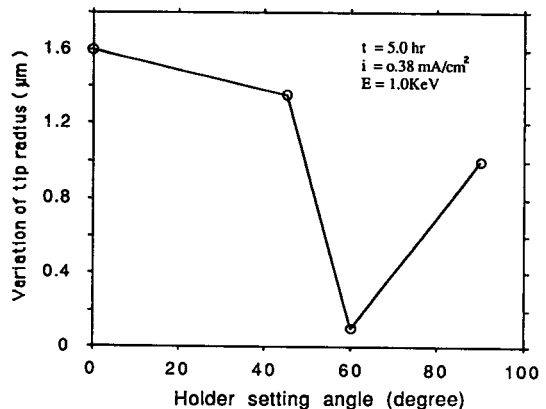


Fig. 16 Tip radius variation of diamond stylus by holder setting angle.

Table 1 Symmetric shape of stylus by holder setting angle

No.	Setting angle	θ_1	θ_2	W	$w_1/w_2 \times 100$	H	$h_1/h_2 \times 100$
	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)	(μm)	(%)	(μm)	(%)
1	0	56	82	113	98.9	43	97.4
2	45	55	81	93	86.2	36	92.5
3	60	57	82	120	11.3	41	94.2
4	90	57	84	97	59.0	35	86.7

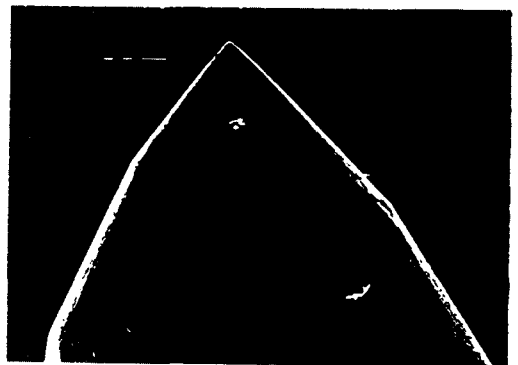
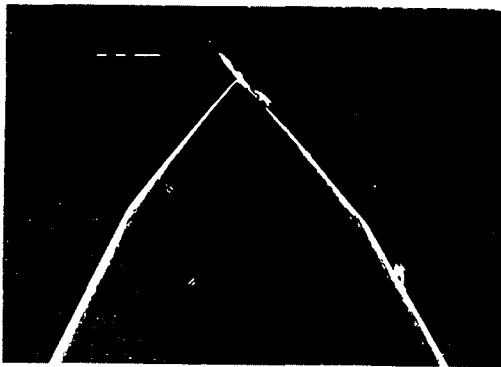
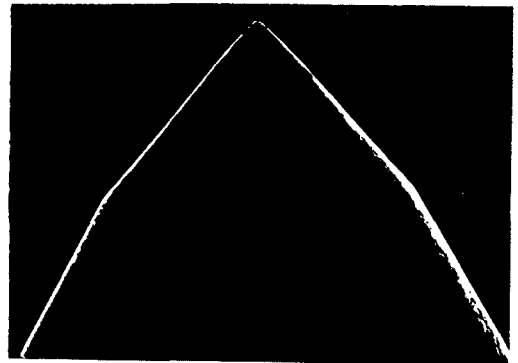
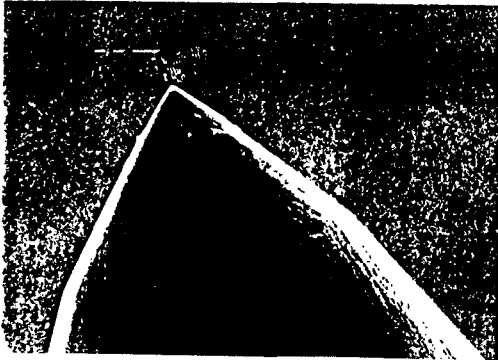
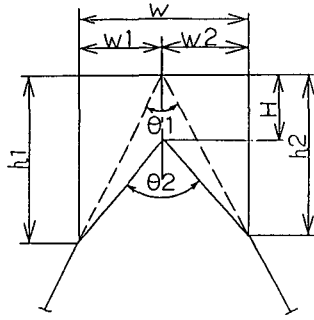


Fig. 17 SEM photo of the ion sputter-machined diamond stylus by holder setting angle

것이며 홀더각도가 0°일 때 실제의 축침에 대한 이온입사각도는 60°정도이고 스파터율이 가장 높으므로⁹⁾ 축침의 선단반경 변화량이 가장 큼을 알 수 있다. 또한, Table 1에는 축침의 홀더각도 설정에 따른 가공된 축침의 형상의 대칭성을 보이고 있으며 Fig. 17에는 홀더설정각도에 의한 축침선단부의 가공상태를 SEM으로 촬영한 사진을 보이고 있다. Table 1에서 알 수 있듯이 가공된 축침의 대칭형상은 홀더설정각도 0°일 때 $W_1/W_2=98.9\%$, $h_1/h_2=97.4\%$ 로서 다른 홀더설정각도와 비교해 볼 때 가장 양호한 대칭형상을 지닌 축침을 가공할 수 있었다. 이는 Fig. 17에서도 추정할 수 있었다. 이로써 다이아몬드 축침의 이온스파터 가공시에는 홀더의 설정각도가 0°가 최적 설정 각도임을 알 수 있었다.

4.3 축침의 자전유무에 의한 축침의 형상

가공대를 공전시키면서 축침홀더를 자전시켰을 때와 자전시키지 않았을 때의 가공된 축침의 3방향 측정의 형상오차를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 알 수 있듯이 3방향 측정의 형상오차의 차는 축침을 자전시키면서 가공할 때는 0.06 μm 이었으나 축침을 자전시키지 않았을 때는 0.13 μm 으로서 축침을 자전시킴으로써 이온빔을 축침에 균일하게 조사시켜서 이온빔의 편중조사를 방지함으로써 가공형상의 균일화를 50%이상 향상시킬 수 있었다.

4.4 마스크의 유무에 의한 축침가공

축침의 마스크의 사용여부에 따른 실험결과를 Fig. 18과 19에 나타내었다. Fig. 18에서, 가공량

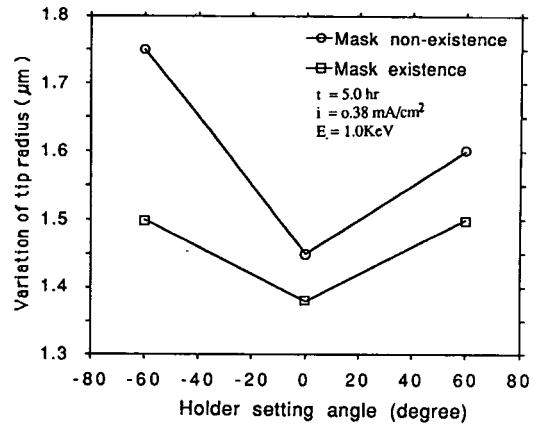


Fig. 18 Tip radius variation of the ion sputter-machined diamond stylus by mask existence and non-existence

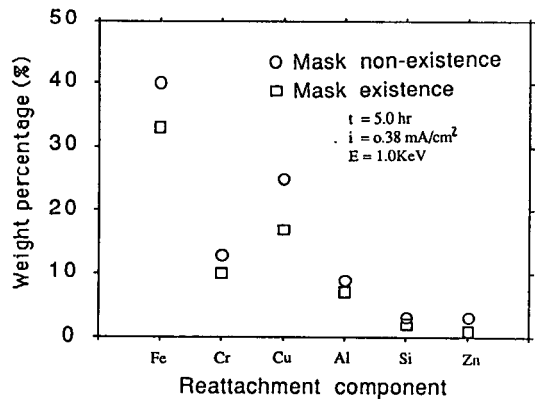


Fig. 19 Reattachment composition to the tip surface of the diamond stylus after ion sputter machining

Table 2 Symmetric form of diamond stylus by holder setting angle

Existence of rotation	Measurement direction	Variation of stylus radius (μm)	Variation of 3-measurement direction (μm)
Rotation existence	0°	0.31	0.06
	60°	0.37	
	-60°	0.33	
Rotation non existence	0°	0.47	0.13
	60°	0.35	
	-60°	0.34	

측면에서 본다면, 마스크를 사용하지 않은 축침의 3축정방향에서의 축침선단반경의 변화량이 마스크를 사용하여 가공된 축침보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 가공하려는 축침을 0.15mm 반경의 원중심에 맞추어서 가공하였기 때문에 마스크의 반경이 이온빔조사에 영향을 미쳤기 때문이라 여겨진다. 즉, 단순히 가공량만을 고려한다면 마스크를 사용하지 않은 경우가 더 많이 가공되었지만 축침의 선단에 부착된 재부착물의 SEM에 의한 성분분석에 의하면 Fig. 19에서와 같이 마스크를 사용함으로써 재부착물을 줄일 수 있었다. 재부착물은 Fe, Cr, Al 순으로 많음을 알 수 있었으며 Fe, Cu, Cr은 가공실 내부에서 스파터된 원자이고 Al은 축침가공대로부터 스파터된 축침이다. 마스크의 사용은 축침선단 부근에 재부착물을 감소시키려는 목적으로 실험을 행하였으며, 재부착물의 감소효과는 있었으나 마스크를 사용함으로써 이온빔의 조사면적이 적게 되고 이로 인해서 축침선단반경의 변화량이 더 적게 됨을 알 수 있었다.

4.5 본 실험 가공조건을 적용한 축침가공

Fig. 20에 이제까지의 실험에서 구한 본 실험 가공조건 즉, 이온에너지 1KeV, 이온전류밀도 0.38 mA/cm², 축침홀더의 설정각도 0°, 축침을 자전시키면서 마스크를 사용하여 가공하는 조건에서 초기 선단반경 2μm, 선단각 90°의 축침 15개를 가공하여 얻은 축침의 가공달성률과 가공조건을 랜덤하게 선택한 경우의 축침의 가공달성률을 나타내었으며

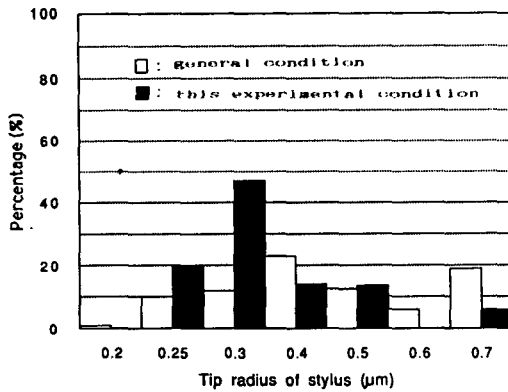


Fig. 20 Achievement ratio of the ion sputter-machined stylus in this experimental and general condition

Fig. 21에는 본 실험 가공조건하에서 가공하였을 때 가공된 축침의 축정방향에 의한 축침선단반경의 변화량 즉 가공의 균일성을 보이고 있다. Fig. 22

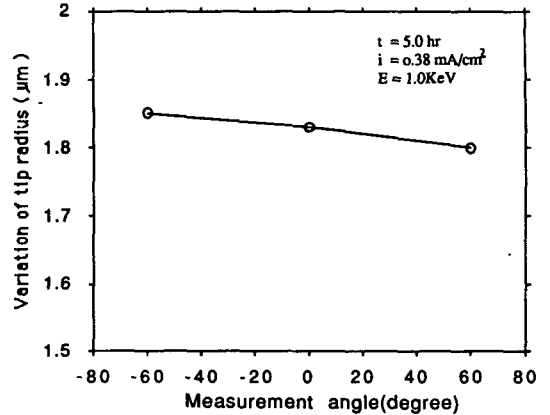
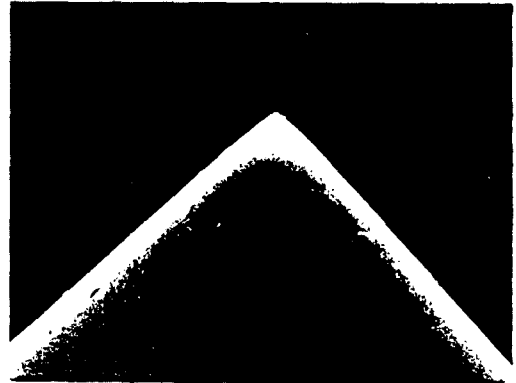
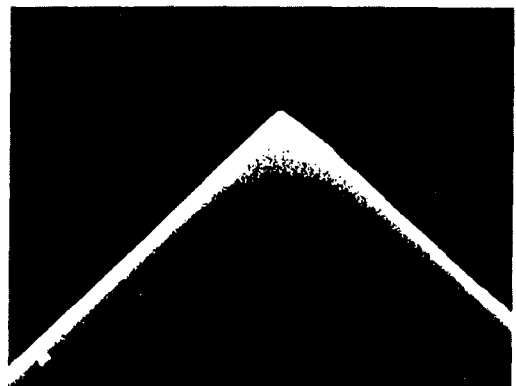


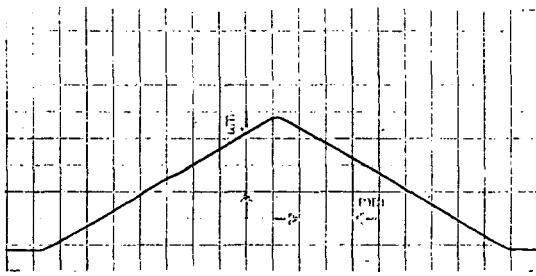
Fig. 21 Variation of tip radius of the ion sputter-machined stylus in this experimental condition



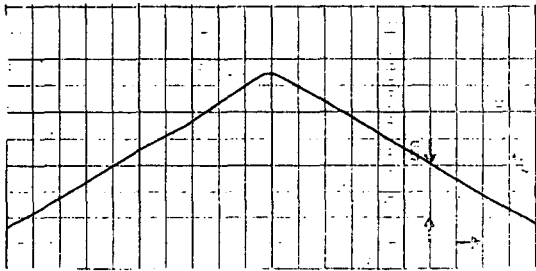
(a) Machining time t=4.5hr



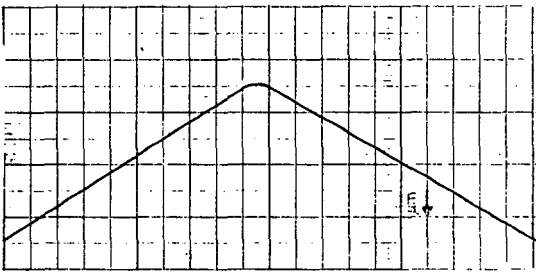
(b) Machining time t=5hr



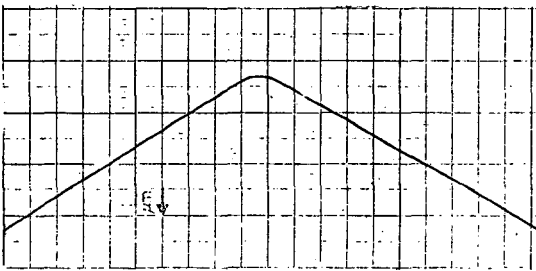
(c) Tip radius 0.25 μm



(d) Tip radius 0.3 μm



(e) Tip radius 0.4 μm



(f) Tip radius 0.5 μm

Fig. 22 E. T and SEM photo of the ion sputter-machined diamond stylus in this experimental machining condition

에는 본 실험 가공조건하에서 가공된 축침의 형상을 SEM과 미세형상측정기로 측정한 결과를 보였다. Fig. 20에서 알 수 있듯이 본 실험 가공조건하에서 가공된 축침의 선단반경이 0.5 μm이하가 될

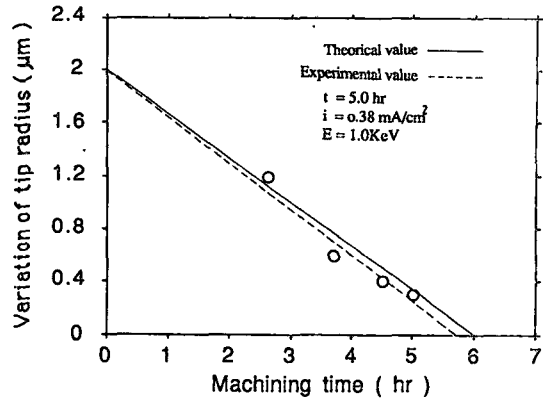


Fig. 23 Relationship between ion sputter machining time and tip radius of diamond stylus

확률은 93%였으나 랜덤하게 가공조건을 선택한 경우에는 59%로서 본 실험 가공조건을 적용시켜 가공함으로써 축침가공 달성률을 약 57%정도 향상시킬 수 있었다. 또한 Fig. 21와 같이 본 실험 가공조건하에서 가공한 축침의 3축정방향에서의 각각의 축침선단반경 변화량의 차는 0.1 μm이하가 되는 양호한 균일 가공성을 보여주고 있다. 본 실험가공조건하에서 가공한 축침의 선단형상은 Fig. 22에서와 같이 대칭성도 양호하고 불순물부착이 거의 없는 축침임을 알 수 있었다. 따라서 미소선단반경을 갖는 다이아몬드 축침은 본 실험에서 구한 최적가공조건을 적용하여 선단반경 0.5 μm이하의 축침을 경제적으로 다량가공할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 23과 같이 이론적으로 예측한 축침의 선단반경의 변화와 본 실험 가공조건에서 가공한 축침의 선단반경의 변화가 잘 일치됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

기계가공으로써는 거의 불가능한 미소선단반경을 갖는 다이아몬드 축침을 이온스파터가공에 의해 가공하는 경우 최적가공조건을 구하기 위한 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이온스파터법에 의한 축침가공은 이온에너지 1KeV에서 전류밀도 0.38mA/cm²로 5시간 가공함으로써 가공 양호한 축침을 가공할 수 있었다.
- (2) 축침홀더의 설정각도는 선단각 90°의 다이아몬드 축침을 가공하는 경우 0°가 최적이었다.

(3) 촉침을 자전시킴으로써 촉침의 3축정 방향에 있어서의 선단반경의 차를 $0.13\mu\text{m}$ 에서 $0.06\mu\text{m}$ 으로 줄일 수 있었다.

(4) 마스크의 사용은 촉침의 선단부의 재부착물을 줄이는데 효과가 있었다.

(5) 최적조건을 적용하여 가공한 결과 $0.3\mu\text{m}$ 이 내의 촉침이 47%를 점유하는 양호한 결과를 얻을 수 있었으며 예측한 선단반경과도 잘 일치하였다.

후 기

본 연구에 있어서 조언을 얻은 일본전자기술 종합연구소의村上 寬 주임연구원, 小坂연구소의 宮本 차장, 直海연구원, 東京理科大学 宮本 岩男 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 遠村健二郎, 1983, “프랑시研削における切入過程の研究”, 精密機械, Vol. 49, No. 2, pp.195~200.
- (2) 奈良治郎, 1980, “最近の表面粗さ測定技術とその動向”, 應用機械工學, No.2, pp.42~49.
- (3) 奈良治郎, 1983, “表面粗さの測定·評價法”, 綜合技術セソク.
- (4) 河村末久, 中村義一, 1988, “表面測定技術とその應用”, 共立出版(株), pp.138~141.
- (5) Miyamoto, I., 1979, “Ion Sputter-machining of Diamond”, Bull. JSPE, Vol. 13, No. 4, pp.219.
- (6) 宮本岩男, 1981, “이온빔가공とその應用”, 精密機械, Vol. 47, No. 5, pp.619~625.
- (7) 長井一敏, 1973, “플라즈마法による이온加工技術”, エレクトロニクス, No. 10, pp.1314.
- (8) Hawkins, D. T., 1975, “Ion Milling”, A Bibliography, J. Vac. Sci. Technol. Vol. 12, No. 6, pp.1389.
- (9) 宮本岩男, 谷口紀男, 1980, “이온스박타加工法の研究(第2報)”, 精密機械, Vol. 46, No. 8, p.1021.
- (10) Spencer, E. G., 1972, “Ion Machining of Diamond”, J. Appl. Phys, Vol.43, No.79, p.2956.
- (11) 宮本岩男, 1983, “이온빔가공によるはまぐり型ダイヤモンド觸針の成形”, 昭和58年精密機械學會, 春季大會學術講演會論文集, pp.742~743.
- (12) Decummun, J.P., Cantagrel, M., 1974, “Development of a General Surface Contour by Ion Erosion-Theory and Computer Simulation”, J. Mater. Sur, Vol.9, No.3., pp.725.
- (13) 韓應教, 盧炳沃, 朴載敏, 1990, “이온스파터加工에 의한 金屬表面의 表面거칠기에 관한 研究”, 大韓機械學會論文集, Vol. 14, No. 3, pp.747~754.
- (14) 毛利衛, 敷坂昭夫譯, 1985, “眞空, 薄膜”, 스팩터링, 技報堂出版, pp.104~126.
- (15) Reader, P. D., White, D.P., 1976, “Ar Plasma Bridge Neutralizer Operation with a 10cm Beam Diameter Ion Etching Source”, J. Vac. Sci. Technol., Vol.15, No.3, pp.1093.
- (16) 宮本岩男, 谷口紀男, 1981, “絶縁物のイオンス박타加工”, 第5會シンポジウム-イオウ源とイオンを基礎とした應用技術, ISIA, No.6, pp.37.
- (17) Miyamoto, I., 1983, “Ion Sputter-Forming of Knife Edge Shaped Diamond Tools”, Bull. Japan. Soc of Prec. Eng., Vol. 17, No. 3, pp.195.
- (18) 佐勝壽芳, 大掘眞敬, 1983, “走査電子顯微鏡(SEM)による表面粗さ測定の研究”, 日本機械學會論文集, Vol. 49, No. 485, pp.227~233.
- (19) 岡田勝藏, 1975, “이온빔가공法による스박타率”, 眞空, Vol.8, No.11, p.384.
- (20) 韓應教, 盧炳沃, 金炳禹, 1989, “이온스파터 가공에 의한 표면거칠기측정용 다이아몬드 촉침의 최적가공조건에 관한 연구”, 1989年度 大韓機械學會 秋季學術大會抄錄集, pp.94~97.
- (21) 直海茂男, 1988, “ダイヤモンド觸針のイオン빔가공”, 小坂研究所報告書.