

〈技術論文〉

이온 스파터 가공에 의한 금속표면의 표면거칠기에 관한 연구

한응교* · 노병옥** · 박재민**

(1989년 12월 23일 접수)

A Study on the Surface Roughness of Metal Workpieces Machined by Ion Sputtering

Eung Kyo Han, Byung Ok Rho and Jae Min Park

Key Words : Ion Sputter Machining(이온 스파터 가공), Surface Roughness(표면 거칠기), Ion-Beam Incidence Angle(이온 빔 조사각도), Sputter Yield(스파터율)

Abstract

Since Ion sputter machining can perform removing processing in atom or molecule units in vacuum state, it has the merit that high precision processing is possible. In this study, therefore, the effect of incidence ion beam is certified to processing amount and surface roughness when longtimed processing is applied. As a result, processing amount is made almost constant with time and the best processing condition is achieved when the incidencial angle of ion is 55°. In addition, processing time for the good surface roughness is defferent respectively to the quality of material and longtimed processing has some defect for achieving good surface roughness.

기 호 설 명

- d : 가공깊이
- K : 비례상수
- $K(\theta)$: 보정비례상수
- R_{max} : 최대 거칠기값
- R_a : 중심선 평균 거칠기
- RMS : 자승 평균 거칠기값
- R_z : 십점 평균 거칠기값
- $S(E, \eta)$: 입사각 θ 에 있어서의 스파터율
- $S(E, I)$: 입사각 0° 에 있어서의 스파터율
- t : 시간
- V : $Z=0$ 면에서의 이온침입속도
- V_0 : (z, dz) 층에서의 원자충돌속도
- V_1 : 타겟트 면내에서의 입자 속도
- $V(\theta)$: 이온 입사각 θ 로부터 결정되는 에칭속도

- V_n : 법선 방향의 에칭 속도
- η : 방향 코사인
- ζ : 굴절률

1. 서 론

공업이 발전함에 따라 정밀도가 요구되는 제품이 필요하게 되었으며 고정밀 제품을 가공하기 위해서는 가공기계의 조립과정, 작동상태, 공구 및 작동부의 마멸, 그리고 진동등에 의한 정밀도의 저하가 문제시 되고 있다.

따라서, 가공량을 극히 미량으로 제어할 수 있음으로서 각광을 받고 있는 전자빔, 방전가공, 레이저가공, 이온 스파터 가공법등이 쓰이고 있으며, 이중에서도 이온 빔에 의하여 물체를 가공하거나 박막을 제작하는데 널리 쓰이는 이온 스파터 가공법은 진공중에서 불활성가스를 주입하여, 가스를

*정회원, 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과
**한양대학교 대학원

플라즈마상태로 만들고, 이것을 고에너지의 이온으로 인출시킬 수 있으므로 고융점재료, 강도가 매우 높은 재료등의 가공에 적합하며 고정밀도로 제품을 가공할 수 있다.

이와같이 고정밀도 가공을 할수있지만, 분자 또는 원자단위로 가공을 하기 때문에 가공속도가 매우 느리다. 이런 단점을 보완하려면 가공조건(전류 밀도, 가공시간, 이온조사각도 등)을 변화시키는 방법으로써 가공속도를 크게 조절할 수 있다. 이러한 이온 빔에 의한 가공법은 물리학적^(1~6), 또는 금속학적 측면에서 이온 스파터울에 관한 연구^(7,8), 이온 스파터 가공시의 가공물표면의 온도변화⁽⁹⁾, 박막제작^(10~13), 무기질재료의 가공⁽¹⁴⁾등에 대한 분석이 주로 연구 되었으며, 가공물의 표면상태로서의 표면거칠기에 대한 연구는 志眞後夫⁽¹⁵⁾등이 SKD1강을 이용하여 검토하였지만 주로 가공시간이 1시간 이내에서 중점적으로 실험한 것이었다. 그러나 이온 스파터 가공에 있어서 가공시간이 1시간 이내에서는 이온 빔의 조사활동이 정상적이라고 볼 수 없으며, 스파터울이 낮은 가공물의 경우에는 충분히 가공되지 못하는 경우도 있다.

따라서 본 연구에서는 장시간 가공하는 경우 가공량과 가공물에 입사되는 이온 빔의 입사각도에 따라 이온 스파터 가공이 표면거칠기에 미치는 영향에 대해서 연구해 보았다.

2. 이온 스파터 가공에 의한 표면거칠기의 변화

스파터울은 분자, 이온의 질량수, 분자의 결합에너지등의 물질정수외에 이온이 가공물 표면에 입사되는 입사각에 의존하고 있다. 따라서 가공물 표면에 이온이 수직으로 입사하고 스파터울의 이온입사각 의존성에 의해 표면형상이 변화하는 모델을 설정한다. 우선 에칭면의 형상변화에 대하여 성립하는 방정식을 구해본다. Fig. 1에서와 같이 표면형상을 $z=f(x, y, t)$ 라 할때 z 축방향의 에칭속도 $(-\partial z/\partial t)$ 는 각 점의 이온입사각 θ 로부터 결정되는 에칭속도 $V(\theta)$ 와 같게된다. 따라서 에칭면의 형상은 다음 식과 같이 변화한다.

$$(\partial f/\partial t) + V(\theta) = 0 \quad (1)$$

여기에서 θ 는 각점에서의 면경사각과 같으며

$$\tan\theta = \sqrt{(\partial f/\partial x)^2 + (\partial f/\partial y)^2} \quad (2)$$

으로된다.

Thompson에 의하면 스파터울 S 는 $\sec \theta$ 에 비례

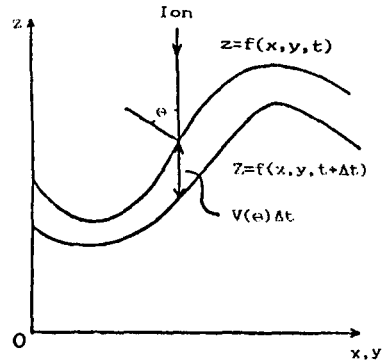


Fig. 1 Variation of surface roughness

하며⁽¹⁶⁾, 따라서 $V(\theta)$ 는 k 를 정수로써

$$V(\theta) = k \cdot \sec(\theta) \quad (3)$$

로 주어진다.

그러나 식 (3)은 여러종류의 재료에 대한 실험결과를 정성적으로 설명할 수 있지만 정량적인 설명이 아니므로 식 (3)을 보정하기 위해 상수 $k(\theta)$ 를 도입하여 θ 에 대하여 전개한다. 재료가 등방성 재료라 가정하면 $k(\theta)$ 는 θ 의 우함수이며 θ 에 대해 2차까지 고찰하면 식 (3)은 변수 A 를 도입하여

$$V(\theta) = V_0(1 + A \sin^2\theta) \sec\theta \quad (4)$$

로 쓸 수 있다.

A 는 Thompson의 식과의 차이를 나타내는 변수이다.

$$(\partial f/\partial t) + V_0(1 + A \sin^2\theta) \sec\theta = 0$$

$$\tan\theta = \sqrt{(\partial f/\partial x)^2 + (\partial f/\partial y)^2} \quad (5)$$

여기서

$$f(x, y, t) = g(x, y, t) + 2AV_0t \quad (6)$$

이라하고 식 (6)을 식 (5)에 대입하면 $g(x, y, t)$ 는 다음식을 만족한다.

$$(\partial g/\partial t) + (2A+1)V_0 \sec\theta = 0$$

$$\tan\theta = \sqrt{(\partial g/\partial x)^2 + (\partial g/\partial y)^2} \quad (7)$$

법선방향의 에칭속도는 $V_n = (-\partial z/\partial t) \cos\theta$ 로 주어진다

곡면 $z=g(x, y, t)$ 에서는 식 (7)로부터

$$V_n = (2A+1)V_0 \quad (8)$$

가 되며 법선방향으로 일정한 속도로 변화함을 알 수 있다.

또한 $z=g(x, y, t)$ 를 t 에 관해서 풀면

$$t = f(x, y, z) \quad (9)$$

이 되며 이 식의 양변을 t, x, y 로 각각 미분하면

$$(\partial g/\partial t) = 1/(\partial f/\partial z),$$

$$(\partial g/\partial x) = -(\partial f/\partial x)/(\partial f/\partial z),$$

$$(\partial g/\partial y) = -(\partial f/\partial y)/(\partial f/\partial z)$$

를 얻는다. 이식을 식 (7)에서 θ 를 제거하여 얻은

$$(\partial g/\partial t)^2 - (2A+1)V_0\{1 + (\partial g/\partial z)^2 + (\partial g/\partial y)^2\} = 0$$

에 대입하면

$$(\partial f/\partial x)^2 + (\partial f/\partial y)^2 + (\partial f/\partial z)^2 = \{1/((2A+1)V_0)\}^2 \quad (10)$$

을 얻는다. 식 (10)은 굴절률을 $\zeta = 1/((2A+1)V_0)$ 로 하면, 광학에 있어서 파면을 기술하는 Hamilton의 특성함수 $f(x, y, t)$ 를 만족시키는 아이코널 방정식⁽¹⁷⁾과 일치한다. 따라서 $z=g(x, y, t)$ 의 변화는 속도 $(2A+1)V_0$ 파면의 운동과 같으며 산란광 및 회절량의 파면은 일반적으로 구면으로 변화하기 때문에 곡면 $z=g(x, y, t)$ 도 매끄러운 구면으로 나타남을 알 수 있다

그러므로 임의의 거칠기를 가진 표면을 이온 스파터 가공함에 따라서 그 표면은 매끄러운 구면상으로 변화하나, 장시간 가공을 계속하게 되면 가공물 표면의 구성입자마다의 스퍼터율이 다름에 따라 매끄러운 구면상이 다시 거칠어지는 효과를 낸다. 따라서 이온스파터 가공시에는 가공시간의 제약을 받게된다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 실험에서 사용한 장치로는 Fig. 2과 같은 내부구조인 Kaufman형 이온 샤워식 가공장치를 이용하였다.

이온원은 가공기의 내부압력 및 전압, 전류 등에 변화가 적고, 안정하게 이온화되는 Ar가스를 주입하여, 음극(필라멘트)에서 발생된 열전자에 의하여 가스가 이온화되고, 이 프라즈마상태의 이온 중에서 (+) 이온만 전위차를 이용하여, Fig. 3과 같은 3개의 다공질인 그리드(직경 92mm 원판에 ϕ 0.35mm의 구멍이 163개 있음)를 통하여 가속화되며, 이때 인출된 이온빔은 중진공상태인 (1×10^{-3} torr이하) 가공실에서 가공물에 충돌하면서 가공이 이루어진다.

3.2 실험방법

(1) 가공방법

Chamber내를 진공상태로 만들기 위해 우선 저

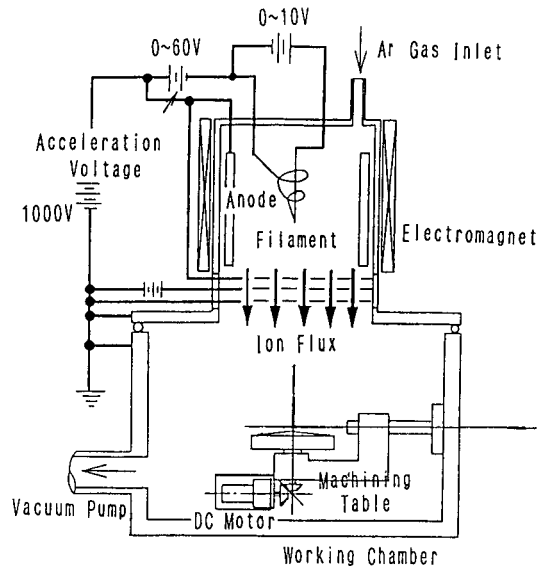


Fig. 2 Inside system of ion sputter-machining

진공용 유회전 진공펌프(RP)를 모터의 가동으로, 피라니진동계(PG1)가 1×10^{-3} torr정도가 될 때까지 진공화시킨 후, 고진공용 유확산 진공펌프를 가동 시킨다. 이때 전리 진공계(PG2)가 1.5×10^{-4} torr이하로 진공이 되면, 전원을 공급하고 Ar가스를 주입한다. 공급된 전원은 Anode 70V, Filament 10V의 전압을 걸어주었다.

Filament에서 방출되는 열전자에 의해 Ar가스를 이온화시켜서 가공물에 이온빔이 조사되도록 하였다. 이때 가공을 위한 이온 가속전압은 1keV, 이온전류밀도 $0.38\text{mA}/\text{cm}^2$ 로 일정하게 유지시키면서 가공했다. 그리드 총면적이 1568.24mm^2 이며 가공에 제공되는 효율이 23.6%로서 인출전류가 25mA 일때 그리드 구멍의 단위면적당의 전류 즉, 이온전류밀도는 $0.38\text{mA}/\text{cm}^2$ 로 된다.

또한 가공시간은 2시간씩 가공하였으며, 표면거칠기측정기를 사용하여 표면거칠기 및 가공깊이를 측정하였다. 그리고 측정후 외부에서 생긴 이물질로 인해서 이온스파터 가공이 방해받지 않도록 초음파 세척기로 세척을 한 후에 다시 가공을 하였다. 또한 각도에 의한 영향을 알아보기 위해서, 수직으로 입사하는 경우를 0° 로 하여, 25° 에서 65° 까지 입사각도를 달리 하면서 같은 방법으로 2시간씩 가공을 한 후 같은 측정기로 측정하였다.

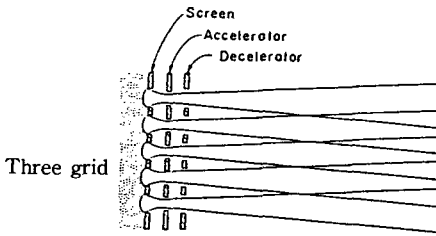
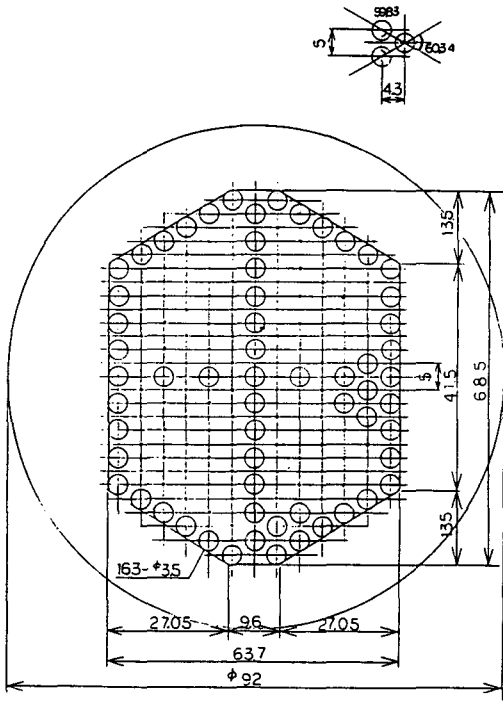


Fig. 3 Grid and ion optic by three grids

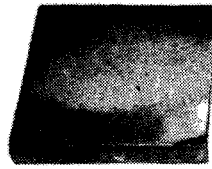
(2) 시험편과 가공표면의 표면거칠기측정

시험편은 A5056인 알루미늄(크기 130mm×130mm)을 프라이머터에 의하여 표면을 기계가공한 것을 이온스파터 가공하였으며, 일명 낫쇠인 BsP₃-H도 같은 방법으로 가공하여 측정해 보았다. 이들의 재질의 성분은 Table 1과 같다. 그리고 Fig. 4는 실험에 사용한 시험편이다.

또한 가공표면의 표면거칠기 측정에는 축침식 표면거칠기 측정장치(Surfcorder SE-30H, KOSAKA Lab., Ltd)를 사용하였다. 측정위치는 가공시료를 90mm×90mm구간을 잡아서 5mm간격으로 종방향과 횡방향으로 각각 19개씩 측정하였다. 이 때 측정된 거칠기 곡선으로부터 각 지점(0~18)의 높이

Table 1 Chemical composition of A5056 and BsP₃-H

	Si	Mn	Fe	Cu	Zn	Al	Pb
A5056	0.6	1.0 -1.5	0.7	0.05 -0.20	—	rem'	—
BsP ₃ -H	—	—	0.07	59.0 -62.0	rem'	—	0.1



BsP₃-H



A5056

Fig. 4 Specimens

차에 의해 가공깊이를 구했으며, 또한 각 지점에서 위치별로 표면거칠기 파라미터 데이터를 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 가공량

Fig. 5, 6에서 볼 수 있듯이 A5056과 BsP₃-H가 거의 균일하게 가공되어 있음을 알 수 있다. 따라서 가공조건을 일정하게 하는 경우, 가공량은 가공시간에 대하여 비례하고 있으므로 적절하게 가공량을 조절할 수 있다고 볼 수 있다. 여기서 가공량은 가공전후의 가공깊이의 차를 말한다. 본 실험에 있어서는 가공초기의 표면의 산화물층, 가공경화층 등의 박막층의 영향과 기계가공시에 발생하는 불순물의 부착에 대한 영향을 고려하여 처음 2시간 동안 가공한것은 제외하고 그 이후의 가공량을 검토하였다. 이 두개의 그림에서 가공물의 중앙부가 많이 가공되어 있으며 가장자리 부분이 적게 가공되어 있는 것을 알수 있는데 이는 중앙부에서 이온빔의 강도가 가장 강하기 때문이라 여겨지며 또한 본 실험에서는 가공면적을 높일 필요성에서 이온 조사방식을 Fig. 2와 같은 이온 샤워방식을 채용하였다. 이러한 이온 샤워형은 그리드로부터 가공물까지 도달하는 동안 이온빔이 분산되는 결점을 가지고 있어서 그림에서 볼 수 있듯이 약간의 치우침 현상이

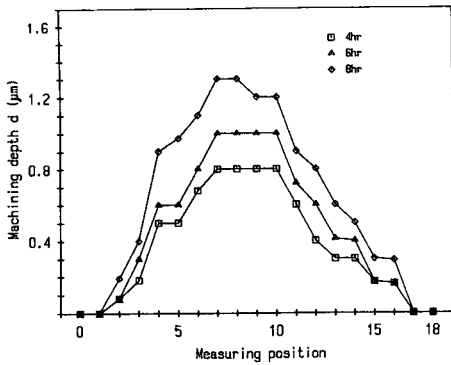


Fig. 5 Relationship between ion machining depth d and machining time according to measuring position

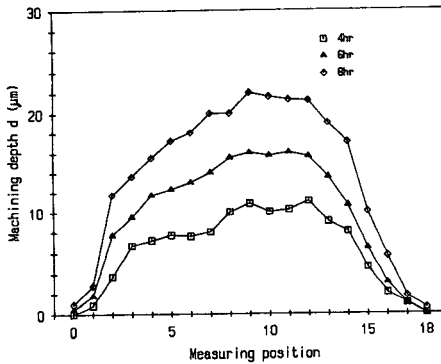


Fig. 6 Relationship between ion machining depth d and machining time according to measuring position

발생하였다. Fig. 5, 6을 비교해 보면 시간에 따른 가공깊이가 A5056시험편 보다는 BsP_3 -H 시험편이 더 많이 가공된 것을 알수 있는데 이러한 이유는 BsP_3 -H 시험편의 스파터율($S=5$)이 A5056 시험편의 스파터율($S=2.4$)보다 크기 때문이다.

4.2 중심부의 표면거칠기 변화

Fig. 7, 8에서 알 수 있듯이 기계가공에 의해서 크게 나타난 표면거칠기 값들이 이온 스파터가공에 의해 줄어든후 일정가공시간이 지나면 다시 서서히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 식 (10)에서와 같이 이온 스파터가공에 의하여 거칠은 돌기상의 표면이 매끄러운 구면형으로 변해가기 때문이라 여겨지며 이는 R_{max} 의 변화로부터도 알 수 있다. RMS 와 R_a 의 값은 이온 스파터가공에 의한 값의

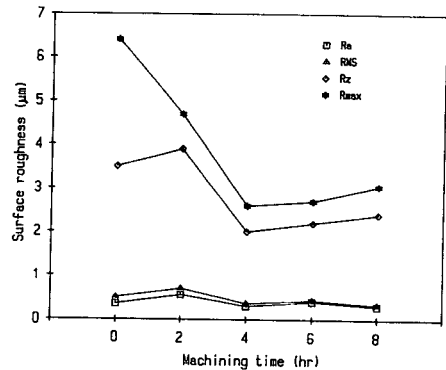


Fig. 7 Variation of surface roughness parameters according to each ion machining time.

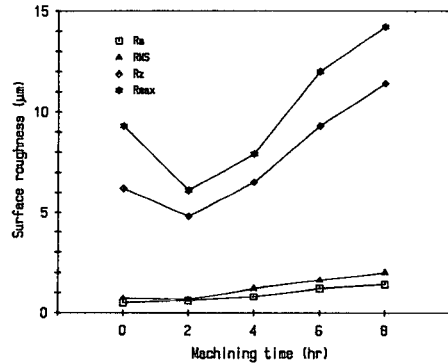


Fig. 8 Variation of surface roughness parameters according to each ion machining time.

변화가 R_{max} , R_z 에 비해 적은 것을 알 수 있는데 이로부터 이온스파터가공에 의해서 표면의 돌기부는 많이 줄어들나 전체적인 거칠기곡선의 변화는 적음을 알 수 있다. 여기에서도 BsP_3 -H의 스파터율이 A5056보다 높기 때문에 같은 가공조건하에서도 거칠기값의 변화가 크게 나타났다.

가공시간이 길어짐에 따라 표면거칠기 값이 더 커지며 이들중 R_{max} 의 변화가 가장 현저하게 나타나는데 이는 일정시간 까지는 표면의 돌기부분이 이온스파터가공 되어 표면거칠기값이 줄어들게 되나 더 이상 가공하게되면 시료의 각 결정입자 마다의 스파터율이 틀리기 때문에 표면은 점점 거칠게 되기 때문이라고 생각된다. 따라서 이온스파터가공은 기계가공에서의 표면거칠기 값을 적게하여 매끄러운 표면가공을 할 수 있으나 가공시간에는 제약

을 받음을 알 수 있다.

4.3 가공량과 표면거칠기의 변화

Fig. 9, 10은 각 부위의 가공량의 크기에 따라 R_{max} 의 변화를 나타낸 것이다. B_8P_3-H 스파터율은 A5056보다 크므로 가공량도 크며, 또 Cu, Zn의 혼합물 이므로 각입자마다 스파터율이 다르기 때문에 같은 시간 동안에 가공한 A5056보다 표면이 더욱 거칠게 된 것으로 여겨진다. Fig. 7~10으로부터 기계가공에 의해 약화된 부위가 이온빔에 의해 거의 제거된후, 양호한 가공면을 얻게되지만 그 이후의 시간에서는 재료에 따라 스파터율이 다르므로 표면거칠기에 미치는 영향도 크게 달라졌음을 보이고 있다. 즉 가공량이 많은 것은 그만큼 이온침입이 많으므로 표면에서 반동된 표면 이온 입자수가 많았음을 나타내고 있다. 또한 스파터율이 높은 두원소(Cu, Zn)로 인하여 중심부에서 평

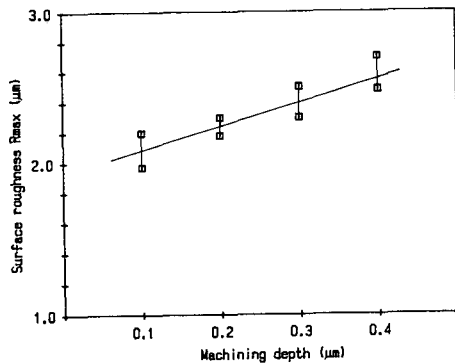


Fig. 9 Relationship between machining depth d and surface roughness R_{max}

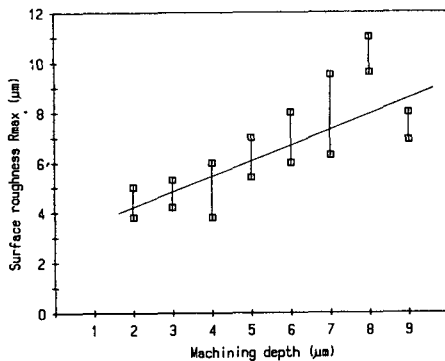


Fig. 10 Relationship between machining depth d and surface roughness R_{max}

균가공깊이는 같은 가공시간 동안 B_8P_3-H 가 A5056보다 약 15배 정도 많이 가공 되었으며 또, 상당히 거칠게 가공 되었다고 볼 수 있다.

4.4 이온 입사각도에 의한 가공량과 표면거칠기

Fig. 11은 이온이 가공물 표현에 각도 θ 로 입사

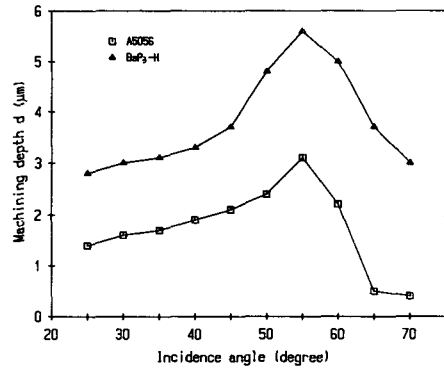


Fig. 11 Relationship between beam incidence angle θ and ion machining depth d .

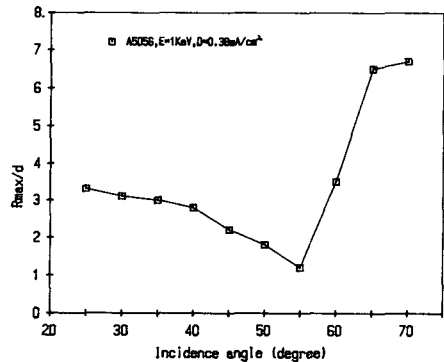
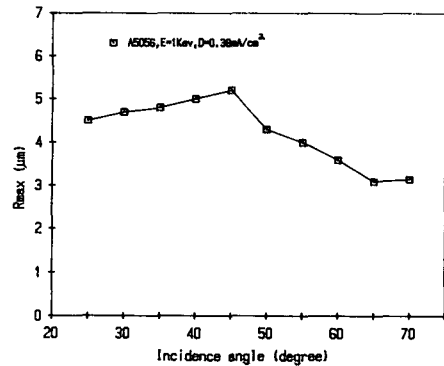


Fig. 12 Variation of surface roughness R_{max} and R_{max}/d on angle of ion incidence θ

될 때 가공량에 미치는 영향을 나타내고 있다. 여기서 입사각도 θ 는 수직으로 입사하는 것을 0° 로 하였다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 가공량은 이온 입사각 55° 일 때가 가장 많음을 알 수 있다. 스파터율을 표현한 Thompson 또는 Sigmund의 수식에서 이온입사각도의 영향을 생각하여 수직입사인 경우와 임의각 θ 일때의 비를 방향여현 η 만으로 나타내면

$$S(E, \eta)/S(E, 1) = \alpha/a_1 = \eta^{-f} = (\cos\theta)^{-f} \quad (11)$$

가 된다⁽¹⁸⁾.

여기에서 $S(E, 1)$ 은 수직($\cos 0^\circ=1$)으로 입사하는 경우의 스파터율이며 η 가 감소(θ 의 증가)하면 스파터율 $S(E, \eta)$ 은 증가한다. 그러나 본 실험에서 식 (11)과는 이온 입사각도가 55° 일 때 까지만 일치하였으며 55° 이상에서는 스파터율이 감소하며 따라서 가공깊이도 저하됨을 알 수 있다. 이는 입사 이온의 침입 깊이와 후방산란의 2가지 요인에

의해서 설명된다. 이온 입사각이 크게 됨에 따라 스파터율이 증가하는 것은 몬테카르로 시뮬레이션⁽¹⁹⁾의 결과로 부터 추정해 보면 이온 입사각이 크게 될수록 충격이온의 침입깊이가 얕게되고 표면부근에서의 에너지교환 비율이 크게되며 따라서 스파터되는 확률이 높아지기 때문이라 여겨진다. 그러나 이온입사각이 점점더 증가하게 되면 오히려 스파터율이 감소되는 이유는 이온입사각이 증가되면 스파터율이 증가되지만 어느 한도의 이온입사각을 넘어 나게 되면 가공물 표면에서의 이온반사가 많아지기 때문이라고 여겨진다. 또한 이온입사각도 90° 에서는 표면에 이온이 입사되지 못하므로 스파터율은 0이 되며 따라서 전혀 가공되지 않는다. Fig. 12, 13은 각각 A5056시료와 B_5P_3-H 시료의 중심부에 있어서의 이온 입사각도별 R_{max} 와 R_{max}/d 의 값을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 이온 입사각도 65° 일 때 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었으나, 가공량에 따른 표면거칠기를 나타내는 R_{max}/d 는 Fig. 12(b), 13(b)에서와 같이 이온 입사각도 55° 에서 1.27, 1.7로 다른 각도보다 매우 작은 값을 보이고 있으므로 이온 입사각도를 55° 로 가공한다면, 다른 각도에 비하여 양호한 면을 얻기에 적절하다고 생각된다.

5. 결 론

장시간 동안 이온 스파터가공에 의해 물체를 가공하는 경우, 가공량과 가공입사각도에 따라 표면 거칠기의 변화를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 가공깊이는 가공시간에 비례하여 증가하지만 가공면의 표면거칠기 R_{max} 는 A5056인 경우 가공시간 4시간, B_5P_3-H 인 경우 가공시간 2시간까지는 감소 되었으나 그 이후에는 가공시간에 따라 R_{max} 량이 급격히 증가된다.

(2) 이온 입사각도에 따른 각도 의존성 때문에 이온 입사각도 65° 부근에서 가장 양호한 R_{max} 값을 얻을 수 있었으나, 가공량에 따른 표면거칠기의 변화를 고려한 R_{max}/d 값은 55° 에서 각각 1.27, 1.7로 적게 나타났다. 따라서 55° 로 가공할 경우 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다고 여겨진다.

(3) 이온 스파터 가공에 의하여 표면거칠기를 개선하는 경우에 각 재료마다 가공시간의 제약을 받을 수 있다.

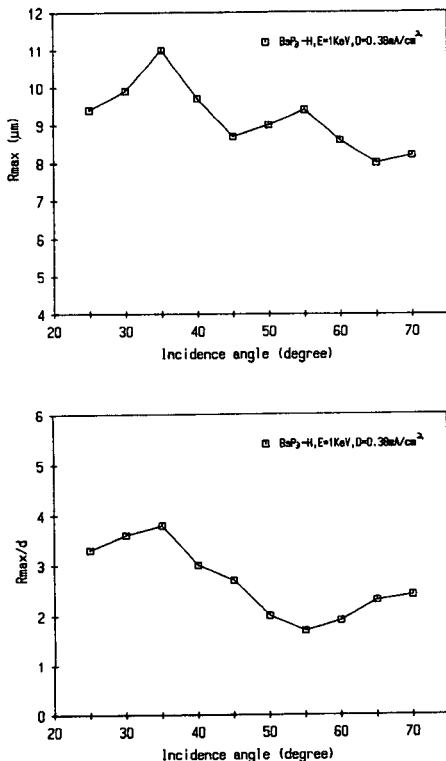


Fig. 13 Variation of surface roughness R_{max} and R_{max}/d on angle of ion incidence θ

후 기

본 연구는 1988, 7.1~1988, 8.31까지 일본 小坂 연구소에서 실험을 하여 완성한 것입니다. 본 실험에 협조해 주신 味岡사장님, 西山 본부장님, 宮本 차장님, 桜井과장님, 直海연구원께 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

- (1) Southern, A.L., 1963, "Sputtering Experiments with 1 to 5KeV Ar Ions", J.App. Phy., Vol.34, No.1, pp.153~163.
- (2) Ziegler, J.F., "The Stopping and Range of Ions in Solid" Ion Implantation Science and Technology, IBM Research.
- (3) Sigmund, P. 1981, "Sputtering from Elastic-collision Spikes in Heavy-ion Bombard Metals", J. App.Phy, Vol. 50, No. 2, p.990.
- (4) Sigmund, P. 1979, "Recoil Implantation and Ion-beam-induced Composition Changes in Alloys and Compounds", J.App. Phy, Vol. 50, No. 11, p.7621.
- (5) 志氷降一 外 5人, 1981, 「스파ッター링」, 應用物理, Vol. 50, No. 5.
- (6) Townsend, P.D, Hartley, N.E, 1976, "Ion Implantation, Sputtering and their Applications", Academic Press.
- (7) Wehner, G.K, 1961, "Sputtering Yield of Metals for Al and Ne Ions with Energies from 50 to 600eV" J. App. Phy; Vol. 32, No. 3, pp.365~369.
- (8) Magnuson, G.D. and Carlston, C.E, 1963, "Sputtering Yield of Single Crystals Bombarded by 1 to 10KeV Ar Ions", J.App. Phy, Vol. 34, No. 11, pp.3267~3273.
- (9) 金釜憲夫, 宮 俊幸, 1979, "イオンビームスパッタ加工における金屬試料の溫度", 精密機械, Vol. 45, No. 8, pp.76~81.
- (10) 直江 正彦, 1981, "イオンビームスパッタによる薄膜作成とその應用", 金屬表面技術.
- (11) Maissel, Leon I and Reinhard Glang, 1981, "Handbook of Thin Film Technology", McGraw-Hill.
- (12) 麻花時立男, 1981, "薄膜作成基礎", 日刊工業.
- (13) 毛利 衡, 1983, "入門眞空薄膜スパッタリング", 技報堂出版.
- (14) 谷口紀男, 1972, "無機材料のイオンビームスパッタ加工" 日本機械學會, Vol. 75, No. 641, pp.106~110.
- (15) 志眞後夫, 井上徳之, 1985, "イオンスパッタ加工の表面粗さに關する研究", 昭和60年 精密學會秋季大會 學術講演會, pp.202~204.
- (16) Thompson, M.W., 1968, "The Energy Spectrum of Ejected Atoms during the High Energy Sputtering of Gold", Phil.Mag., Vol. 18, p.337.
- (17) Born, M. Wolf, E., 1970, "Principle of Optics", Pergamon Press 4th ed, p.112.
- (18) Sigmund, P., 1969, "Theory of Sputtering I; Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Tartget", Phy. Rev., Vol. 184, No. 2, pp.384~416.
- (19) 魚住 潤, 宮本 岩男, 1978, "イオンスパッタのモンテカルロシミュレーション昭和53年度 精密學會 春季大會 學術講演會, pp.485~486.