

혼 해석을 통한 초음파 폴리싱 시스템의 개발 및 연마특성

박병규*, 김성청⁺, 문홍현⁺⁺, 이찬호⁺⁺⁺, 강연식⁺⁺⁺

(논문접수일 2003. 11. 8, 심사완료일 2004. 1. 28)

The Polishing Characteristics and Development of Ultrasonic Polishing System through Horn Analysis

Byung Gyu Park*, Sung Chung Kim⁺, Hong Hyun Moon⁺⁺, Chan Ho Lee⁺⁺⁺, Yeon Sik Kang⁺⁺⁺

Abstract

We have developed and manufactured an experimental ultrasonic polishing machine with frequency of 20kHz at the power of vibration 1.7kw for effective ultrasonic polishing in processing of high hardness material. Design of the horn is performed by the FEM analysis. The following conclusions were empirically deduced through experimental results to clarify the major elements which affect the surface roughness during the ultrasonic process by following the experimental plans. The ultrasonic polishing machine has been developed in parts of structure part, ultrasonic generator, vibrator. We were able to process the high hardness material without difficulty as a result of ultrasonic polishing by utilizing the groove added step-type horn. Through analyzing by applying the experimental plans, the rotating speed of the horn was determined to be the major factor in influencing the surface roughness. In the case of ceramic, wafer, we were able to obtain good surface roughness when the feed rate and the ultrasonic output were higher. Because the load on slurry particle increases when the ultrasonic output is higher, the processed surface becomes worse in the case of optical glass.

Key Words : Horn Analysis(혼 해석), Ultrasonic Polishing(초음파 폴리싱), Ceramic(세라믹), Optical Glass(광학유리), Wafer(웨이퍼), Surface Roughness(표면 거칠기)

1. 서론

최근 기계공업의 발전과 함께 가공정밀성이 나날이 높아

지면서 점차 고강도 고경도의 우수한 기계적 성질을 갖는 재료가 요구되고 있으며 이에 더불어 취성 등에 의한 가공상의 문제점이 발생되고 있다.

* 주성대학 컴퓨터응용기계과 (bgpark@jsc.ac.kr)
주소: 363-794 충북 청원군 내수읍 덕암리 산 4번지
+ 충북대 기계공학부
++ 청송제2보호감호소
+++ 충북대 대학원 정밀기계공학과

이처럼 가공상의 문제점을 갖고 있는 재료들을 난삭재라 하며 이를 대표할 수 있는 재료로 세라믹(Ceramic), 광학유리(Optical glass), 웨이퍼(Wafer) 등이 있다. 이들의 재료는 반도체, 자동차, 원자력, 항공우주산업 등에 주로 사용되는 공업재료로 고성능과 다양한 기능을 갖추면서 신소재의 출현과 함께 나날이 발전하고 있다. 현재까지 난삭재 가공에는 실용적으로 다이아몬드 휠에 의한 연삭가공이 주로 사용되고 있으나 휠의 마모가 빠르고 연삭저항이 증대하며, 글레이징, 로우딩 등의 현상으로 장시간 능률적인 가공이 어렵다. 그리고 방전가공, 레이저가공 및 화학적 가공 등의 특수가공법에도 의존하고 있으나 형상가공, 고정도의 표면가공을 얻기가 어렵다. 이러한 문제점들을 최소화하기 위하여 새로운 가공법인 초음파 가공법을 들 수 있다⁽¹⁻³⁾. 초음파 진동자를 이용한 진동절삭장치를 구상하여 가공면의 표면 거칠기를 종전의 방법보다 약 30% 정도 향상시킬 수 있는 결과⁽⁴⁾를 제시하였고, 초음파진동을 이용하여 초경합금이나 세라믹과 같은 난삭재를 가공하는데도 뛰어난 가공방법임을 확증하고 있다. 본 연구에서는 개발한 초음파 폴리싱 장치를 사용하여 세라믹, 광학유리, 웨이퍼 등을 탄화규소 입자로 초음파 가공할 때, 가공능률 및 정밀도를 높이기 위하여, 혼의 해석으로 공구를 최적 설계하였으며, 또한 효율적인 실험을 위하여 실험계획법을 적용하였다. 실험계획법은 주어진 인자와 조건에 대하여 요인별로 특성치를 재배치, 정리하여 어떤 인자가 특성치에 가장 큰 영향을 미치는가를 통계적으로 규명하는 실험방법이다⁽⁵⁾. 본 실험에서는 효율적인 실험을 위해 직교배열을 이용하였으며 실험결과에 대한 분석방법은 분산분석(Analysis of Variance)으로 수행하였다. 초음파 가공면의 표면 거칠기에 미치는 인자들의 영향정도를 분석하고 이중 가장 강력한 영향력을 갖는 인자의 검출과 표면 거칠기를 향상시킬 수 있는 최적의 초음파 가공조건을 도출하는 것이다. 실험에 사용된 주요 인자들로는 혼의 회전수, 이송속도, 초음파 출력 등을 파라미터로 적용하였고, 이들에 의하여 구성된 초음파 가공조건의 변화에 따라 표면 거칠기의 제어인자를 규명하였다.

2. 초음파 폴리싱 가공기의 개발

2.1 초음파 폴리싱의 개념

초음파 폴리싱은 공구에 초음파 진동과 회전을 주어 공구와 공작물 사이에, 물과 수용성 절삭유와 입자를 혼합하여 만든 슬러리(Slurry)액을 넣어 공구 진동에 의한 충격으로

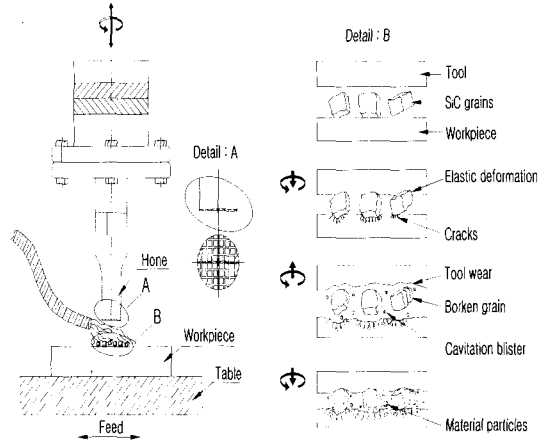


Fig. 1 Mechanism of material removal in ultrasonic polishing

극미세 가공하는 방법으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 그 원리와 가공 순서를 나타내었다. 초음파 가공의 특징은 공구의 진동에 의한 슬러리의 충격작용으로 금속 및 비금속의 드릴링, 절단, 표면가공 등을 할 수 있고, 슬러리의 충격에 의한 파쇄량이 극미소이기 때문에 고정밀도와 아주 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있으며, 또한 가공물에 변형과 가공열에 의한 잔류응력이 발생되지 않는 것이 특징이라 할 수 있다. 또한 이 경우 1회 진동의 가공량은 적지만 매초 수만 번의 가공이 이루어지므로 충분한 가공 속도를 얻을 수 있다⁽⁶⁾.

2.2 초음파 공구(Horn)의 설계

혼의 설계는 피가공물의 재질과 혼의 무게에 따라 선택되어야 하며, 강도와 경도가 중요한 인자가 된다. 그리고 재질의 주파수에 따른 파장의 길이, 재질내의 파동전파속도, 영률 및 밀도 등의 물성치도 중요하다. 피가공물을 가공시 피가공물의 재질이 혼보다 강하게 되면 지립에 의하여 혼도 같이 가공이 되어버리며, 혼의 무게가 무거운 경우는 혼의 부피도 커지며, 이는 내부 파동전파 손실이 커진다는 것을 의미한다. 또한 혼의 단면비가 줄어들지 않을 경우에는 끝단의 진폭이 원하는 만큼 나오지 않는 경우가 많다. 따라서 예비 실험을 통하여 반복적인 설계와 제작으로 최적의 치수를 결정하였다.

지금까지 사용되어온 기본적인 혼의 형태는 Fig. 2와 같이 단면이 지수 함수적으로 변화하는 지수함수혼(Expo-

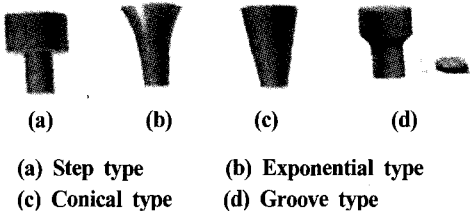


Fig. 2 Configuration of horn

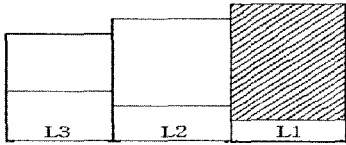


Fig. 3 Dimension of step horn

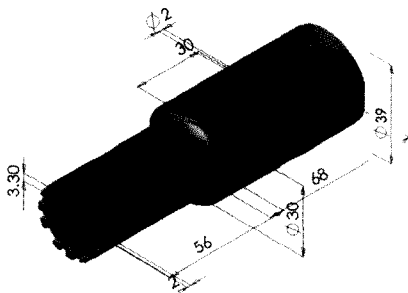


Fig. 4 Designed of horn

ponential type), 원추형의 원추혼(Conical type), 단차형의 혼(Step type) 등이 있으나⁽⁷⁾, 본 폴리싱 장치 실험에 사용한 혼은 Fig. 2(a)와 같은 단차형 혼의 밑면에 홈(Groove type)을 가공하여 Fig. 2(d)와 같은 혼을 제작하였으며, 이는 회전하는 혼에 슬러리가 잘 혼입 되도록 고려한 것이고, 재질은 표면경화용 SNCM815 강재를 진공열처리로 H_RC 60으로 하였다.

본 연구에서는 단차형 혼을 사용하였는데 단차형 혼은 Fig. 3과 같은 형태를 가지며 모델링된 형상은 Fig. 4에 나타나 있다.

L2와 L3를 더한 부분이 단차형 혼 부분이고 빗금친 부분이 진동자이다. 이때의 면적은 S₁, S₂, S₃이고 파동상수는 $\alpha = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 인데 여기서 종파의 속도 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 이다. 이 때 경계조건은 결합되어 있는 부분에서 진폭이 제로가 된다는 가정 하에 원점으로 잡고 이 부분은 진폭의 변화가 없다고 하면 이 때 일차원 파동 방정식

$$\rho S_x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left(S_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (1)$$

여기서 u 는 변위이며 ω 는 주파수이다. 식 (1)으로부터 변수 분리법 $u(x, t) = U(x)G(t)$ 를 이용하여 미분한 식들을 위의 식에 넣어 식을 전개한 후 다음의 경계조건을 이용하면

$$x = -l_1 \quad \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$x = 0 \quad u_1 = u_2 \quad S_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = S_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \quad (3)$$

$$x = l_2 \quad u_2 = u_3 \quad S_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = S_3 \frac{\partial u_3}{\partial x} \quad (4)$$

$$x = l_2 \quad l_3 \quad \frac{\partial u_3}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

이 때의 공진 조건 식은 유도되어지는 다음의 식으로부터

$$\tan \alpha l_1 = \frac{\frac{S_3}{S_1} \tan \alpha l_1 + \frac{S_2}{S_1} \tan \alpha l_1}{1 - \frac{S_3}{S_2} \tan \alpha l_2 \tan \alpha l_3} \quad (6)$$

$x = 0$ 에서 진폭이 0이 되는 진동의 절점으로 보면

$$\tan \alpha l_2 \tan \alpha l_3 = -\frac{S_3}{S_2} \quad (7)$$

위의 식이 얻어진다.

혼의 직경 D₂=30mm, D₃=39mm를 위 식을 적용하여 혼의 길이를 L₂=68mm, L₃=56mm로 하여 혼의 치수를 결정하였다. 설계한 혼의 형태는 Fig. 4와 같은 형태를 가진다. 단차형 혼의 일반적인 파동방정식을 이용한 형태와는 중간에 덧붙여지는 부분이 있어 달라지고 앞의 돌기가 있어 길이의 비가 변화하여 달라지기 때문에 상용해석프로그램인 ANSYS를 이용한 FEM해석을 하여 그 적합성의 판단의 근거로 삼았다. 해석은 ANSYS에서 해석타입을 모달로 하여 해석을 수행하였다. 해석 옵션에서 그 범위를 19,000Hz에서 30,000Hz까지로 하여 고유 진동수를 구하였다. 범위를 위에서와 같이 주어진 것은 진동자에서 주어지는 주파수가 20kHz이기 때문이다.

여기서 진동자에서 주어지는 주파수가 20kHz이고 해석 값이 20.091Hz이므로 이 값들을 비교해보면 오차가 약 0.5% 이내에 들어오는 값을 가지므로 혼의 모델링이 적절

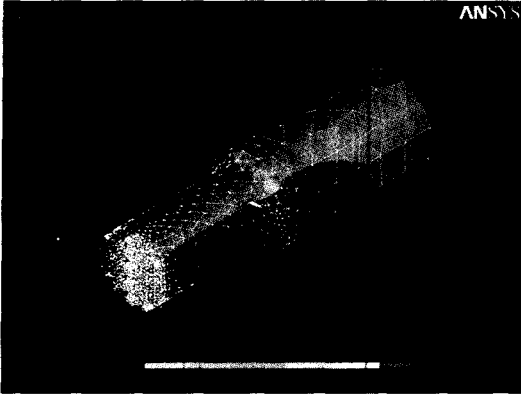


Fig. 5 FEM analysis of horn

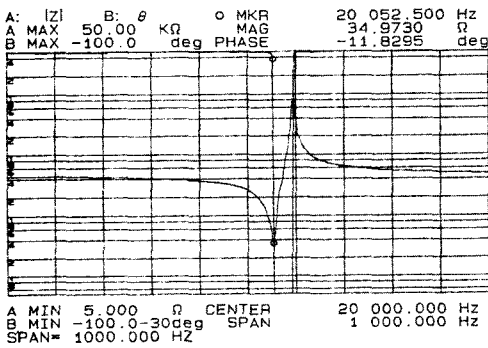


Fig. 6 Experiment value of horn

하다고 볼 수 있다. 그리고 혼의 길이가 짧아지게 되면 그 주파수가 커져서 나중에 제작하고 나서 사용이 불가능 할 수 있기 때문에 다음을 위해서 조금 길게 결정하였다.

이 형태를 가지고 혼의 1차 고유진동수를 얻어내면 Fig. 5와 같이 얻게 되어지고 제작된 혼을 임피던스 측정기 HP4194A로 그 값의 측정을 하게 되는데 중간 선을 20kHz로 놓고 각 눈금의 값을 1kHz로 설정을 한 후 측정을 하게 되며 재료마다 고유 주파수에서 각 상이 급격하게 변하게 되며, 임피던스를 측정한 값은 Fig. 6과 같다.

FEM 해석을 통하여 제작되어진 혼의 임피던스 측정값은 20.052Hz이며 이 값을 해석 값 20.091Hz과 비교하면 차이가 40Hz정도 나는 것을 확인할 수 있다. 이 값은 식에 대입 되는 값 20kHz와 오차가 거의 없으므로 적합하게 혼의 설계가 되었다고 판단된다.

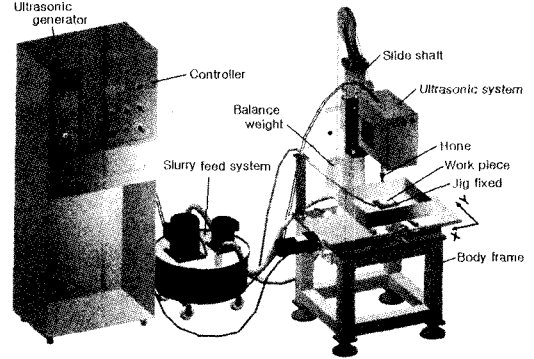


Fig. 7 Schematic diagram of ultrasonic polishing machine

2.3 초음파 폴리싱 머신의 구조 및 설계

초음파 폴리싱 머신을 크게 기구부와 초음파 발전기, 진동자, 혼으로 구분하여 제작하였으며, Fig. 7은 제작한 초음파 폴리싱 머신의 그림이다. 기구부는 몸체(Body frame)에 컬럼(Column)을 세우고, 여기에 초음파 장치(Ultrasonic system)을 장착하였으며, 항상 일정한 가공력이 걸리도록 추(Balance weight)를 설치하였고, 베드는 x, y방향으로 이동되며 좌우는 기어드 모터(Geared motor)를 사용하여 리이드와의 회전비는 1:180으로 자동 이동되도록 하였다. 또한 혼은 모터에 의해 회전 할 수 있도록 하였고 혼의 회전은 최대 60rpm으로 조정이 가능할 수 있도록 설계, 제작하였다. 발전기에는 공진 주파수 20kHz, 출력 1700w의 자력식 초음파 발전기를 사용하였다. 슬러리 공급장치는 절삭유와 슬러리를 혼합하기 위하여 교반용 임펠러(Impeller)를 설치하였으며, 가공 중 슬러리 공급을 위한 순환펌프를 설치한 30ℓ 탱크 용량으로 제작하였다.

3. 실험

3.1 시험편과 공구

본 실험에 사용된 시험편은 3종의 난삭재료인 세라믹(Si_3N_4), 광학유리(Optical glass), 웨이퍼(Wafer)를 사용하였으며, 시험편의 규격은 15(W)×20(H)×70(L)mm의 스틱(Stick)형으로 제작하였다. 시험편의 기계적 성질은 Table 1 ~ Table 3에 나타내었다. 초음파 폴리싱에 사용한 공구는 글루부형으로 설계, 제작한 초음파 발생부 직경 ϕ 30mm 혼을 사용하였고, 슬러리액은 SiC성분 92%, 비중3.16인 C(Black silicon carbide)계로 입도 1,000을 사용하였다.

Table 1 Mechanical properties of Si₃N₄

Mechanical properties	Bending strength (MPa)	Vickers hardness HV(GPa)	Fracture toughness (MN/m ^{3/2})
Si ₃ N ₄	780	16	6

Table 2 Mechanical properties of optical glass

Mechanical properties	Knoop hardness (N)	Elastic proportion (N)	Poisson's ratio
Optical glass(BK7)	65.4	8.80	0.207

Table 3 Mechanical properties of wafer

Mechanical properties	Vickers hardness HV(GPa)	Purity(%)	Specific gravity
Wafer	12	99.99	2.33

Table 4 Factors and levels used in experiment

Sign	Factor	Unit	Levels		
			1	2	3
A	spindle speed of horn	rpm	20	40	60
B	Feed rate	mm/min	19	33	47
D	output of ultrasonic	w	800	1200	1700

Table 5 Orthogonal array table for L₉(3⁴)

No.	Factor			
	A	B	C(E)	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

3.2 실험 방법

본 실험은 설계, 제작한 초음파 폴리싱 머신을 사용하여 테이블 위에 정밀 바이스를 설치한 후 공작물을 고정하였으며, 실험에 사용한 실험 기기는 Fig. 7과 같다. 초음파 가공에 사용한 슬러리의 혼합비는 물 : 수용성 절삭유 : 입자를 각각 10:1:1로 하고, 혼합된 슬러리 공급 유량을 21.75(ml/sec)로 하였다. 초음파 가공조건은 가공결과에 영향을 미치는 혼의 회전수, 이송속도, 초음파 출력 등을 인자로 설정하고 각각의 경우에 대해서 등 간격으로 수준을 배치하였으며 선정된 인자와 수준은 Table 4와 같다. 표면 거칠기에 영향을 미친다고 생각되는 인자와 수준들을 L₉(3⁴)의 직교배열표를 이용하여 배치하였고 이를 Table 5에 나타내었다. 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 간단히 짤 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표이다. 직교배열표에는 2, 3, 4, 5 수준계 및 혼합 수준계 등이 있으나, 2, 3 수준계가 많이 사용된다. 직교배열표는 L_A(B^C)의 형태의 기호로 나타낸다. L은 직교배열표를 처음에 라틴스퀘어(Latin Square)에 사용하면서 따온 글자이며, A는 실험의 크기, B는 수준 수, C는 인자의 수를 나타낸다.

직교배열표에 의한 가공실험을 통하여 각 시험편의 최대

높이 거칠기(R_{max})를 3회 측정한 후 평균하여 분산분석의 순서로 실시하였다. 또한 재료별 거칠기 분석 및 비교를 용이하게 하기 위하여 Mahr사의 분해능 0.01/μm의 복합 형상/거칠기 측정기를 이용하여 표면형상을 3차원 분석하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 세라믹(Si₃N₄)의 초음파 연마 특성

Fig. 8은 입도가 1000인 탄화규소(SiC) 슬러리로 세라믹(Si₃N₄)을 연마하였을 때의 표면 거칠기(R_{max})값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산 분석한 결과를 Table 6에 나타내었다. Fig. 9는 세라믹의 표면 거칠기(R_{max}) 형상을 나타낸 것으로, 측정길이 0.56mm를 선정하여 토포그래피(Topography)방식으로 분석하였다.

표면 거칠기에 기여하는 인자는 혼의 회전수-초음파 출력-이송속도의 순서로 나타났으며 표면 거칠기의 영향에 B인자인 이송속도가 미치는 영향이 다른 요인에 비해 매우 작으며 A인자인 혼의 회전수가 다른 인자에 비해 표면 거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수

있다. Table 7은 이송속도를 풀링(Pooling)하여 분산 분석한 결과를 나타내었다. 여기서 풀링이란 오차분산이나 다른 인자들의 분산에 대해 상대적으로 큰 유의성(Significance)을 나타내지 못하는 인자를 실험상 나타날 수 있는 오차로 판단하여, 오차인자로 판단함을 의미하고 옳은 판단인가에 대한 검증은 분산비 즉 F검정으로 확인한다. Table 8은 풀링 후 표면 거칠기 값을 유의한 인자에 대하여 재배치 한 것이다. Table 8에서 보는 바와 같이 표면 거칠기의 최소화 요인은 A₁B₃D₂의 조건이다. 즉 혼의 회전수는 20rpm, 이송 속도는 47mm/min, 초음파 출력은 1200w의 조건이 표면 거칠기를 최소화하는 최적가공 조건으로 나타났다. 이러한 이유는 소성변형에 의한 칩 발생보다는 혼의 선단에 가해지는 초음파 진동의 충격력에 의해 세라믹재료의 특성상 취성

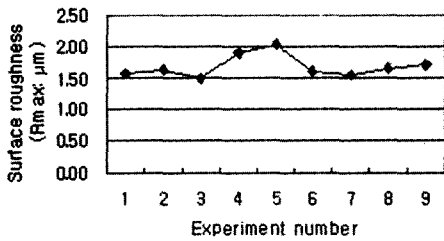


Fig. 8 Variation of surface roughness for experiment number(material : Si₃N₄, slurry : SiC #1000)

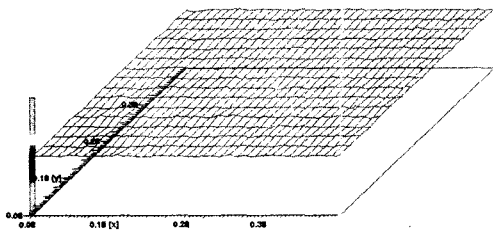


Fig. 9 Three-dimensional form of surface roughness for Si₃N₄

Table 6 ANOVA table for R_{max}

Factor	S	ϕ	V
A	0.13	2	0.07
B	0.04	2	0.02
C(E)	0.03	2	0.02
D	0.05	2	0.03
T	0.25	8	

Table 7 ANOVA table for R_{max} after pooling

Factor	S	ϕ	V	F ₀	F(0.10)	F(0.05)
A	0.13	2	0.07	3.50	4.32	6.94
B	pooled factor					
C(E)	0.07	4	0.02			
D	0.05	2	0.03	1.50	4.32	6.94
T	0.25	8				

Table 8 Effective level sum of factor for R_{max}

	A	B	D
1	4.66	5.00	5.29
2	5.52	5.28	4.75
3	4.90	4.80	5.04

파괴 현상이 점차적으로 부가되어 미세 파괴로 칩이 배출되기 때문에 이송속도의 영향보다는 혼의 회전수 변화에 따라서 표면 거칠기에 영향을 미친다고 생각된다.

4.2 광학유리의 초음파 연마 특성

Fig. 10은 입도가 1000인 탄화규소(SiC) 슬러리로 광학유리를 연마하였을 때의 표면 거칠기(R_{max})값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산 분석한 결과를 Table 9에 나타

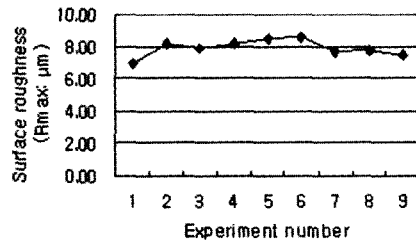


Fig. 10 Variation of surface roughness for experiment number (material : optical glass, slurry : SiC #1000)

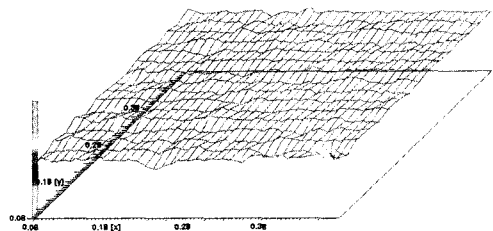


Fig. 11 Three-dimensional form of surface roughness for optical glass

Table 9 ANOVA table for R_{max}

Factor	S	ϕ	V
A	1.06	2	0.53
B	0.46	2	0.23
C(E)	0.08	2	0.04
D	0.40	2	0.20
T	2.00	8	

Table 10 ANOVA table for R_{max} after pooling

Factor	S	ϕ	V	F_0	F(0.10)	F(0.05)
A	1.06	2	0.53	4.42	4.32	6.94
B	0.46	2	0.23	1.92	4.32	6.94
C(E)	0.48	4	0.12			
D	pooled factor					
T	2.00	8				

Table 11 Effective level sum of factor for R_{max}

	A	B	D
1	22.99	22.74	22.81
2	25.10	24.38	24.34
3	22.84	23.81	23.78

내었다. Fig. 11은 광학유리의 표면 거칠기(R_{max}) 형상을 나타낸 것으로, 측정길이 0.56mm를 선정하여 토포그래피 방식으로 분석하였다. 표면 거칠기에 기여한 인자는 혼의 회전수-이송속도-초음파 출력의 순서로 나타났으며 A인자인 혼의 회전수가 다른 인자에 비해 표면 거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 10은 초음파 출력을 풀링하여 분산 분석한 결과를 나타내었다. Table 11에서 보는바와 같이 표면 거칠기를 최소화하는 요인은 $A_3B_1D_1$ 의 조건이다. 즉 혼의 회전수는 60rpm, 이송속도는 19mm/min, 초음파 출력은 800w의 조건이 표면 거칠기를 최소화하는 최적가공조건으로 나타났다. 이는 혼의 회전수가 높고 이송속도가 적을수록 표면 거칠기는 양호하나, 초음파 가공을 할 때 20kHz부근에서 20 μ m 정도의 진폭이 발생하므로 슬러리 입자에 걸리는 힘이 증가하여 표면 거칠기가 불량해진다고 생각된다.

4.3 웨이퍼의 초음파 연마 특성

Fig. 12는 입도가 1000인 탄화규소(SiC) 슬러리로 웨이퍼를 연마하였을 때의 표면 거칠기(R_{max})값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산 분석한 결과를 Table 12에 나타내었다. Fig. 13은 웨이퍼의 표면 거칠기(R_{max}) 형상을 나타낸 것으로, 측정길이 0.56mm를 선정하여 토포그래피 방식으로 분석하였다. 표면 거칠기에 기여한 인자는 이송속도-혼의 회전수-초음파 출력 등의 순서로 나타났으며 B인자는 이송속도가 다른 인자에 비해 표면 거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 13은 초음파 출력을 풀링하여 분산 분석한 결과를 나타내었다. Table 14에서 보는바와 같이 표면 거칠기를 최소화하는 요인은

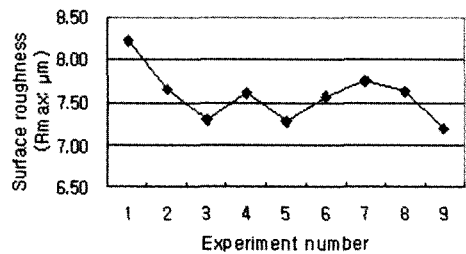


Fig. 12 Variation of surface roughness for experiment number (material : wafer, slurry : SiC #1000)

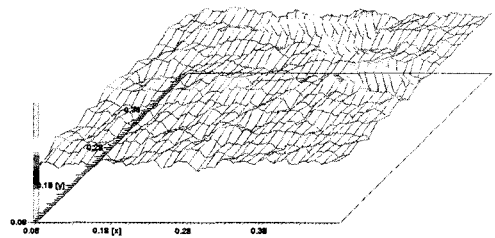


Fig. 13 Three-dimensional form of surface roughness for wafer

Table 12 ANOVA table for R_{max}

Factor	S	ϕ	V
A	0.10	2	0.05
B	0.40	2	0.20
C(E)	0.24	2	0.12
D	0.03	2	0.02
T	0.77	8	

Table 13 ANOVA table for R_{max} after pooling

Factor	S	σ	V	F_0	F(0.10)	F(0.05)
A	0.10	2	0.05	0.71	4.32	6.94
B	0.40	2	0.20	2.86	4.32	6.94
C(E)	0.27	4	0.07			
D	pooled factor					
T	0.77	8				

Table 14 Effective level sum of factor for R_{max}

	A	B	D
1	23.16	23.57	22.70
2	22.46	22.55	22.96
3	22.56	22.06	22.52

$A_2B_3D_3$ 의 조건이다. 즉 혼의 회전수는 40rpm, 이송속도는 47mm/min, 초음파 출력은 1700w의 조건이 표면 거칠기를 최소화하는 최적가공조건으로 나타났다. 이는 재료의 특성 상 결정 방향에 따른 이송속도와 혼의 회전수에 따라서 표면 거칠기에 영향을 미친다고 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 고경도 재료의 가공에 효과적인 초음파 폴리싱을 위해 주파수 20kHz, 초음파출력 1.7kW급의 실험용 초음파 폴리싱 머신을 혼 설계 · 해석 통하여 제작하고, 실험계획법을 이용하여 초음파 가공할 때 표면 거칠기에 영향을 미치는 주요인자에 대해서 규명하기 위한 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 초음파 폴리싱 머신은 기구부, 진동자 등을 설계 · 제작하였으며, 혼은 단차형에 홈을 추가한 글루부 타입으로 적용하여 초음파 폴리싱을 한 결과 고경도 재료를 원활하게 가공할 수 있었다.
- (2) 혼의 설계에 있어서 FEM 해석을 통해 구한 혼의 특성 값과 제작한 혼의 실험 특성 값이 비슷한 결과로 나타

남으로써 혼의 설계오차를 최소화하여 최적의 혼을 제작하였다.

- (3) 실험계획법을 적용하여 분석한 결과 혼의 회전수가 표면 거칠기에 가장 영향을 미치는 주요인자로 나타났다.
- (4) 각 재료의 가공 표면에 대하여 3차원 형상으로 분석을 한 결과 세라믹이 가장 양호한 가공형상을 보여주며 세라믹과 웨이퍼의 경우 이송속도와 초음파 출력이 큰 경우가 양호한 표면을 얻을 수 있었다.
- (5) 광학유리의 경우는 초음파 출력이 크면 슬러리 입자에 걸리는 부하가 증가함으로 가공표면이 불량해진다.

참고 문헌

- (1) Pei, Z. J., Ferreira, P. M., Kapoor, S. G., and Haselkoran, M., 1995, "Rotary Ultrasonic Machining for Face Milling of Ceramics," *Int. J. Mach. Tools Manufacture*, Vol. 35, pp. 1033~1046.
- (2) Choi, I. H., and Kim, J. D., 1997, "Characteristics of Chip Generation with Ultrasonic Vibration Cutting in the Extremely Low Cutting Velocity," *Trans. of KSME*, Vol. 21, pp. 655~662.
- (3) Choi, H. J., 1996, *Development of Ultrasonic machine*, Korea Institute of Industrial Technology, pp. 31~36.
- (4) Miyasaka, K., Kasuya, U., and Yoshikawa, T., 1988, "Study on Cutting Technology of Difficult to Machine Materials-Structure and Cutting Performance of Ultrasonic Cutting Machine," *Trans. of JIMM*, Vol. 42, No. 3, pp. 89~95.
- (5) Park, S. H., 2001, *Modern experiment design*, Minyoungsa, pp. 16~18.
- (6) Lee, S. W., and Choi, H. Z., 2001, "A Study on Micro Ultrasonic Machining Using Ultrasonic Vibrator," *Advances in Abrasive Technology IV*, pp. 357~363.
- (7) Kang, J. H., 1996, "A Study on an Ultrasonic Vibration Assisted Grinding for Ceramics," *Trans. of KSAE*, Vol. 4, No 5, pp. 37~48.