

초음파 폴리싱 시스템의 개발 및 특성

문홍현*, 박병규**, 김성철***, 이찬호****

The Polishing Characteristics and Development of Ultrasonic Polishing System

H. H. Moon*, B. G. Park**, C. H. Lee***, S. C. Kim****

*:Teacher, #12 Vocational Training Center, Ministry

Tel:043-296-8171, 011-485-4155

***: Professor, School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

Tel: 043-261-2443, Fax: 043-263-2448

Email:sckim@cbucc.chungbuk.ac.kr

ABSTRACT

We have developed the ultrasonic polishing system to get super finishing that consist of machine part that can rotate and travel the main shaft with power 1.5kW, ultrasonic generator with frequency 20kHz. By using this system we were investigated the characteristics of ultrasonic polishing and deduced the major factors which affect the surface roughness by the experimental plans for three different materials such as ceramic, glass, and wafer, and so could be obtained following results. We could be obtained the excellent surface for hard-to-difficult cutting materials. The rotating speed could be found to be major factor influencing the surface roughness. In the case of ceramic and wafer, we were able to obtain good surface roughness when the feed rate and ultrasonic output is higher. In the case of glass, the surface roughness becomes worse when ultrasonic output is higher because of increasing of load affecting on the particles in slurry.

Key Words : Ultrasonic Polishing(초음파 폴리싱), Ceramics(세라믹재료), Surface roughness(표면거칠기)
Brittle fracture(취성파괴), Ultrasonic Polishing System(초음파 폴리싱 시스템)

1. 서 론

† 청주교도소 전산응용기계과

E-mail : hhmooon7@hanmail.net

TEL : (043)296-8171 FAX : (043)296-7950

* 주성대학 캐드응용설계공학과

** NC공작기계연구조합 시험평가센터

*** 충북대학교 기계공학과

최근 반도체, 자동차, 원자력, 항공우주산업 등은 공업재료의 고성능과 다양한 기능을 갖춘 많은 신소재의 출현으로 발전하고 있다. 신소재 중의 하나인 세라믹스(ceramics)는 내열, 내식, 내마멸성과 고강도를 지닌 우수한 기능을 가진 소재라 할 수 있다. 이는 금속 재료에 비해 고경도이므로 가공 시 절삭저항 증가, 공구수명 단축 등으로 인하여 가공정밀도, 가공능률 등 어려운 문제점들이 많다.

현재 세라믹 가공에 실용적으로 다이아몬드휠에 의한 연삭가공이 주로 사용되고 있으나 고경도, 고강도, 경취성 재료이므로 휠의 마모가 빠르고 연삭저항이 증대하며, 글레이징, 로우딩 등의 현상으로 장시간 능률적인 가공이 어렵다.

이러한 문제점들을 최소화하기 위하여 새로운 가공법인 초음파 가공법을 들 수 있다.^[1,2] 압전소자의 초음파 진동자를 이용한 진동절삭장치를 구상하여 가공면의 표면거칠기를 종전의 방법보다 약 30%정도 향상시킬 수 있는 결과를^[3]를 제시하였고, 초음파진동을 이용하여 초경합금이나 세라믹스와 같은 난삭재를 가공하는데도 뛰어난 가공방법임을 확증하고 있다.^[4]

본 연구에서는 개발한 초음파 폴리싱 장치를 사용하여 세라믹, 유리, 웨이퍼 등을 탄화규소 입자로 초음파 가공할 때 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 표면거칠기에 미치는 인자들의 영향정도를 분석하고 이중 가장 강력한 영향력을 갖는 인자의 검출과 표면거칠기를 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 표면거칠기의 제어인자를 규명하였다.

본 논문에서는 세라믹, 유리, 웨이퍼 등의 난삭재 가공 시 가공능률 및 정밀도를 높이기 위하여 초음파 폴리싱 시스템을 개발하였고, 실제 재료를 실험계획법을 적용하여 가공 후 결과 분석을 통하여 개발된 시스템의 성능을 확인하고자 하였다.

2. 초음파 폴리싱 가공기의 개발

2.1 초음파 폴리싱의 개념

초음파란 주파수가 높아서 인간의 귀에 들리지

않는 음으로 20,000Hz(20kHz)이상의 주파수 음이다. 이러한 초음파의 이용은 크게 나누어 2종류 즉 통신적 응용과 동력적 응용으로 구분되며, 통신적 응용범위는 수중 탐지기, 유속 유량계 등에 사용되며, 동력적 응용은 초음파를 에너지로 이용하는 것으로 응용범위는 세척기, 피로시험 등에 사용된다.

초음파 폴리싱은 공구에 초음파 진동과 회전을 주어 공구와 공작물 사이에, 절삭유에 입자를 혼합하여 만든 슬러리액을 넣어 공구 진동에 의한 충격으로 극미세 가공하는 방법으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 그 원리와 가공 순서를 나타내었다. 초음파 가공법은 세라믹과 같은 취성이 강한 난삭재 등의 가공에 넓게 사용되고 있으며, 초음파 가공 기술을 난삭재 가공의 생산성 향상을 가져 올 수 있는 유망한 기술로 수요가 계속 증가 하고 있다. 초음파 가공의 특징은 공구의 진동에 의한 슬러리(Slurry)의 충격작용으로 금속 및 비금속의 드릴링, 절단, 표면가공 등을 할 수 있고, 슬러리의 충격에 의한 파쇄량이 극미소하기 때문에 고정밀도의 아주 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있으며, 또한 가공물에 변형과 가공열에 의한 잔류응력이 발생되지 않는 것이 특징이라 할 수 있다. 또한 이경우 1회 진동의 가공량은 적지만 매초 수만 번의 가공이 이루어 지므로 충분한 가공 속도를 얻을 수 가 있다.^[6]

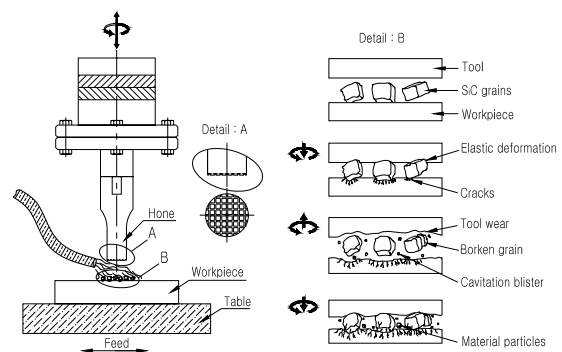


Fig. 1 Mechanism of material removal in ultrasonic polishing

2.2 초음파 진동자

초음파 발생 방법으로는 진동자를 이용하며 진동자는 크게 압전 진동자, 전왜 진동자, 자왜

진동자로 나눌 수 있으며, 오늘날 고출력 초음파의 발생원은 주로 볼트 조임 랑주반형 변환기(BLT : Bolt Clamped Langevin Type Transducer)가 사용되고 있다. BLT는 두 개의 금속 매스(Mass) 사이에 압전 세라믹스를 삽입하여 볼트로 조임 체결한 구조이다. 이 구조는 집적기(Booster), 혼(Horn)과 같은 기계적 음향 임피던스 정합(Mechanical Acoustic impedance Matching) 장치와 방사기구들을 통하여 고출력의 초음파 진동을 대상체에 장시간 연속적으로 방출할 수 있다. 이때 압전세라믹스는 인장응력에 대해 매우 취약하므로 고진폭 진동하에서 파괴가 일어날 수 있다.

BLT는 볼트 조임으로 압전세라믹스에 정적 압축응력을 인가하여 이점을 해결한 것이다.

2.3 초음파 공구 (Hone) 설계

지금까지 사용되어온 기본적인 혼의 형태는 Fig. 2와 같이 단면이 지수 함수적으로 변화하는 지수함수혼(Exponential type), 원추형의 원추혼(Conical type), 단차형(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 고려했던 것이고, 재질은 표면경화용 SNCM815 강재를 진공열처리로 H_RC 60으로 하였다.

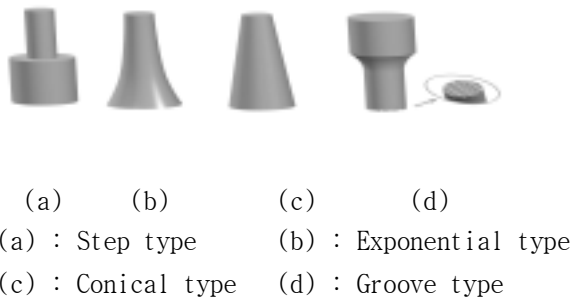


Fig. 2 Configuration of hone

2.4 초음파 폴리싱 머신의 구조 및 설계

초음파 폴리싱 머신을 크게 기구부와 초음파 발전기, 진동자, 혼으로 구분하여 제작하였으며, Fig. 3은 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 모타(Geared motor)를 사용하여 리이드와의 회전비는 1:180으로 자동 이동되도록 하였다. 또한 혼은 모타에 의해 회전할 수 있도록 하였고 혼의 회전은 최대 60rpm으로 조절이 가능할 수 있도록 설계, 제작하였다. 발전기에는 공진 주파수 20kHz, 출력 1700w의 자러식 초음파 발전기를 사용하였으며 회로도는 Fig. 4와 같다. 슬러리 공급장치는 Fig. 3에서 보는바와 같이 절삭유와 슬러리를 혼합하기 위하여 교반용 임펠러(Impeller)를 설치하였으며, 가공 중 슬러리 공급을 위한 순환펌프를 설치한 30 l 탱크 용량으로 제작하였다.

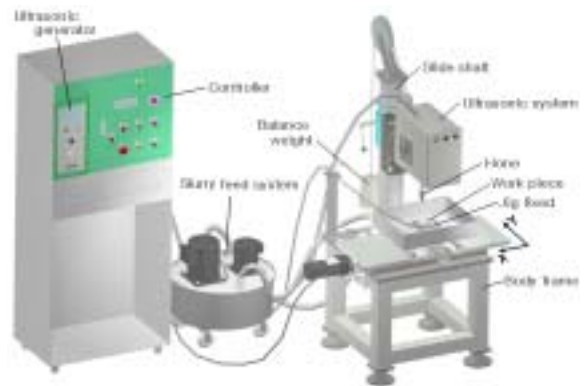


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic polishing machine

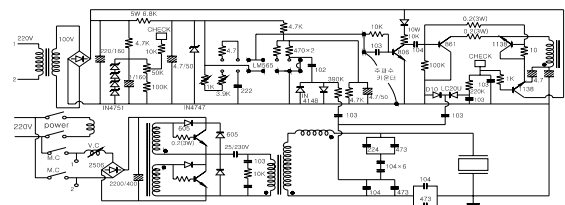


Fig. 4 Circuit diagram of ultrasonic generator

3. 실험

3.1 시험편과 공구

본 실험에 사용된 시험편은 3종의 난삭재료인

세라믹(Si₃N₄), 유리(Flat glass), 웨이퍼(Wafer)를 사용하였으며, 시험편의 규격은 15(W)×20(H)×70(L)mm의 스틱(Stick)형으로 제작하였다. 초음파폴리싱에 사용한 공구는 글루부형으로 설계, 제작한 초음파 발생부 직경 ø20mm 혼을 사용하였고, 입자는 SiC 성분92(%), 비중3.16인 C(Black silicon carbide)계로 입도 1,000을 사용하였다.

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. 3과 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. 시험편의 표면상태를 측정하기 위하여 측정식 조도계(Surftest-301, Mitutoyo)를 이용하여 측정하였으며, 초음파 가공조건은 가공결과에 영향을 미치는 혼의 회전수, 이송속도, 초음파 출력 등을 인자로 설정하고 각각의 경우에 대해서 등 간격으로 수준을 배치하였으며 선정된 인자와 수준은 Table 1과 같다. 표면거칠기에 영향을 미친다고 생각되는 인자와 수준들을 L₉(3⁴)의 직교배열표를 이용하여 배치하였고 이를 Table 2에 나타내었다. 직교배열표에 의한 가공실험을 통하여 각 시험편의 최대높이 거칠기(Rmax)를 3회 측정 후 평균하여 분산분석의 순서로 실시하였다. 또한 재료별 거칠기 분석 및 비교를 용이하게 하기 위하여 Mahr사의 분해능 0.01µm의 복합형상/거칠기 측정기를 이용하여 표면형상을 3차원 분석하였다.

Table 1 Factors and levels used in experiment

Sign	Factor	unit	levels		
			1	2	3
A	spindle speed of hone	rpm	20	40	60
B	Feed rate	mm/min	19.44	33.33	47.22
D	output of ultrasonic	w	800	1200	1700

Table 2 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

4. 실험결과 및 고찰

4.1 세라믹(Si₃N₄)의 초음파 연삭 특성

Fig. 5는 입도가 1000인 탄화규소(SiC) 슬러리로 질화규소(Si₃N₄)를 폴리싱 하였을 때의 표면거칠기(R_{max})값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. Fig. 6은 질화규소의 표면거칠기(Ra) 형상을 나타낸 것으로, 측정길이 0.56mm를 선정하여 Topography 방식으로 분석하였다.

표면거칠기에 기여하는 인자는 혼의 회전수-초음파 출력-이송속도의 순서로 나타났으며 표면거칠기의 영향에 B인자인 이송속도가 미치는 영향이 다른 요인에 비해 매우 작으며 A인자인 혼의 회전수가 다른 인자에 비해 표면거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 4는 이송속도를 풀링(Pooling)하여 분산분석한 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 검정은 분산비 즉 F검정으로 확인한다. Table 5는 풀링 후 표면거칠기 값을 유의한 인자에 대하여 재배치 한 것이다. Table 5에서 보는 바와 같이 표면거칠기의 최소화 요인은 A₁B₃D₂의 조건이다. 즉 혼의 회전수는 20rpm, 이송속도는 47 mm/min, 초음파 출력은 1200w의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적가공 조건으로 나타났다. 이러한 이유는 소성변형에 의한 칩 발생보다는 혼의 선단에 가해지는 초음파 진동의 충격력에 의해 세라믹재료의 특성상 취성파괴 현상이 점차적으로 부가되어 미세 파괴로 칩이 배출되기 때문에 이송속도의

영향보다는 혼의 회전수 변화에 따라서 표면거칠기에 영향을 미친다고 생각된다.

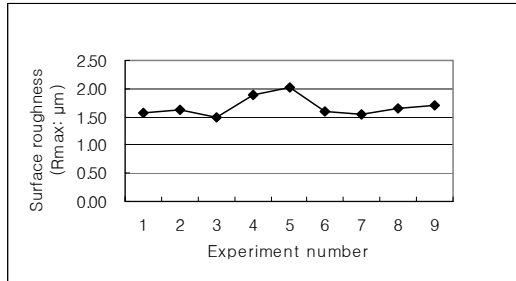


Fig. 5 Variation of surface roughness for experiment number(material : Si₃N₄, slurry : SiC #1000)

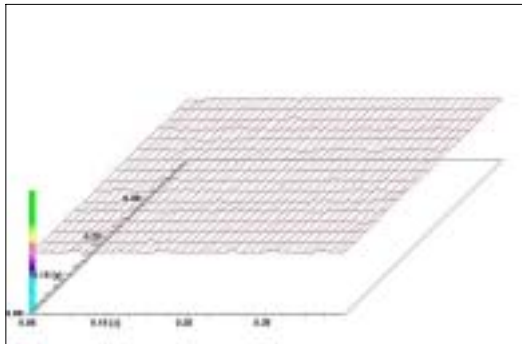


Fig. 6 Three-dimensional form of surface roughness for Si₃N₄

Table 3 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 4 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 5 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

4.2 유리의 초음파 연삭 특성

Fig. 7은 입도가 1000인 탄화규소(SiC) 슬러리로 유리를 연삭하였을 때의 표면거칠기(R_{max}) 값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산분석한 결과를 Table 6에 나타내었다. Fig. 8은 유리의 표면거칠기(Ra) 형상을 나타낸 것으로, 측정길이 0.56mm를 선정하여 Topography 방식으로 분석하였다. 표면거칠기에 기여한 인자는 혼의 회전수-이송속도-초음파 출력의 순서로 나타났으며 A인자인 혼의 회전수가 다른 인자에 비해 표면거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 7은 초음파 출력을 풀링하여 분산분석한 결과를 나타내었다. Table 8에서 보는바와 같이 표면거칠기를 최소화하는 요인은 A₃B₁D₁의 조건이다. 즉 혼의 회전수는 60rpm, 이송속도는 19 mm/min, 초음파 출력은 800w의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적가공조건으로 나타났다. 이는 혼의 회전수가 높고 이송속도가 적을수록 표면거칠기는 양호하나, 초음파 가공을 할 때 20kHz 부근에서 20μm 정도의 진폭이 발생하므로 슬러리 입자에 걸리는 힘이 증가하여 표면거칠기가 불량해진다고 생각된다.

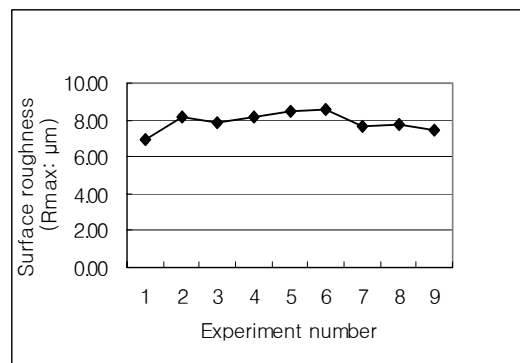


Fig. 7 Variation of surface roughness for experiment number (material : glass, slurry : SiC #1000)

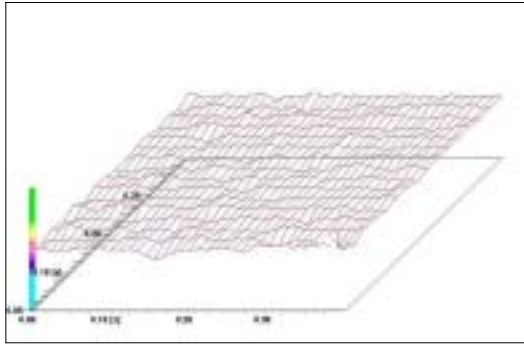


Fig. 8 Three-dimensional form of surface roughness for Glass

Table 6 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 7 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 8 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

4.3 웨이퍼의 초음파 연삭 특성

Fig. 9은 입도가 1000인 탄화규소(SiC) 슬러리로 웨이퍼를 연삭하였을 때의 표면거칠기(R_{max})값

을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산분석한 결과를 Table 9에 나타내었다. Fig. 10은 웨이퍼의 표면거칠기(R_a) 형상을 나타낸 것으로, 측정길이 0.56mm를 선정하여 Topography 방식으로 분석하였다. 표면거칠기에 기여한 인자는 이송속도-혼의 회전수-초음파 출력 등의 순서로 나타났으며 B 인자는 이송속도가 다른 인자에 비해 표면거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 10은 초음파 출력을 풀링하여 분산분석한 결과를 나타내었다. Table 11에서 보는바와 같이 표면거칠기를 최소화하는 요인은 $A_2B_3D_3$ 의 조건이다. 즉 혼의 회전수는 40 rpm, 이송속도는 47 m/min, 초음파 출력은 1700w의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적가공조건으로 나타났다. 이는 재료의 특성상 결정 방향에 따른 이송속도와 혼의 회전수에 따라 표면거칠기에 영향을 미친다고 생각된다.

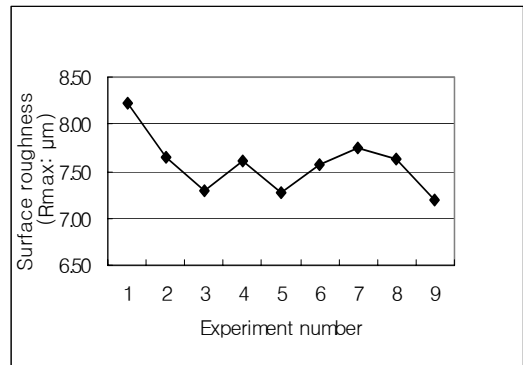


Fig. 9 Variation of surface roughness for experiment number (material : wafer, slurry : SiC #1000)

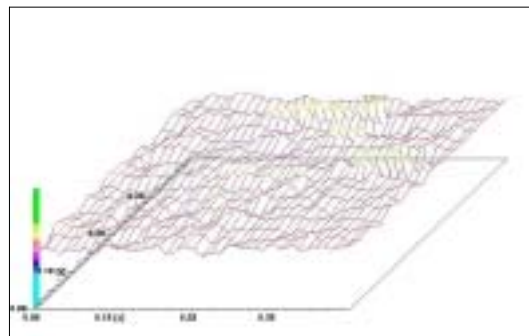


Fig. 10 Three-dimensional form of surface

roughness for Wafer

Table 9 ANOVA table for R_{max}

Factor	S	σ	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 10 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 11 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

5. 결 론

본 연구에서는 고경도 재료의 가공에 효과적인 초음파 폴리싱을 위해 공진 주파수 20KHz, 출력 1.7KW급의 실험용 초음파 폴리싱 머신을 설계·제작하고, 실험계획법을 이용하여 초음파 가공할 때 표면거칠기에 영향을 미치는 주요인자에 대해서 규명하기 위한 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 초음파 폴리싱 머신은 기구부, 초음파 발전기, 진동자를 설계·제작하였으며, 혼은 단차형에 홈

을 추가한 타입으로 적용하여 초음파 폴리싱을 한 결과 고경도 재료를 원활하게 가공을 할 수 있었다.

2. 실험계획법을 적용하여 분석한 결과 혼의 회전수가 표면거칠기에 가장 영향을 미치는 주요인자로 나타났다.

3. 각 재료의 가공 표면에 대하여 3차원 형상으로 분석을 한 결과 세라믹이 가장 양호한 가공형상을 보여주었다.

4. 세라믹과 웨이퍼의 경우 이송속도와 초음파 출력이 큰 경우가 양호한 표면을 얻을 수 있었다.

5. 유리의 경우는 초음파 출력이 크면 슬러리 입자에 걸리는 부하가 증가함으로 가공표면이 불량해진다.

참고문헌

1. 최인휴 외, “극저속에서 초음파 진동가공에 의한 칩생성 특성에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집 A, pp 655 ~ 662, 1997
2. 최현중 외, “초음파 가공기 개발에 관한 연구,” 생산기술, pp.31~36, 1996.
3. Miyasaka, K., Kasuya, U., and Yoshikawa, T., “Study on Cutting Technology of Difficult to Machine Materials-Structure and Cutting Performance of Ultrasonic Cutting Machine,” JIMM, Vol.42, No.3, pp.89~96, 1988.
4. 鈴木 清, 植松 哲太郎, “超音波研削加工の基礎,” 機械と工具, 第6月, pp.89~95, 2000.
5. 박성현, "현대 실험 계획법," 민영사, pp.16-18, 2001.
6. S. W. Lee, H. Z. Choi, "A Study on Micro Ultrasonic Machining Using Ultrasonic Vibrator," Advances in Abrasive Technology IV, pp.357~363, 2001.
7. 강재훈, “초음파 진동을 부가한 세라믹스 연삭가공에 관한 연구,” 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제5호, pp.37~48, 1996.