

## 실험계획법에 의한 초음파가 부가된 자기연마가공의 특성평가<sup>§</sup>

진 동 현\* · 곽 재 섭\*†

\* 부경대학교 기계공학과

### Experimental Verification of Characteristics of Magnetic Abrasive Polishing Combined with Ultrasonic Vibration

Dong-Hyun Jin\* and Jae-Seob Kwak\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received January 15, 2015 ; Revised April 8, 2015 ; Accepted April 13, 2015)

**Key Words:** Magnetic Abrasive Polishing(자기연마가공), Ultrasonic Machining(초음파 가공), Taguchi Method(다구치기법), Design of Experiment(실험계획법)

**초록:** 본 논문에서는 고경도의 재료를 효과적으로 가공하기 위하여 초음파-자기연마 복합가공을 제시하고, 초음파-자기연마 복합가공의 효율성을 검증하기 위해, 실험계획법을 적용하여 각 인자의 영향력을 평가하였다. 그 결과, 기존의 자기연마가공보다 초음파-자기연마가공의 가공효율이 더 높게 나타났으며, 초음파-자기연마 복합가공에서 가장 적절한 주파수는 28kHz 인 것으로 나타났다. 또 표면거칠기에 대한 인자의 영향을 평가하였을 때, 초음파의 진폭이 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 그러나 55µm의 진폭이 적용되었을 때, 자속밀도의 변화에도 불구하고 가공효율이 오히려 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 지나치게 큰 초음파 진폭은 오히려 자기연마가공의 효과를 저하시키는 것임을 알 수 있었다.

**Abstract:** In this paper, we propose an ultrasonic magnetic abrasive polishing (US-MAP) technique to effectively machine a high-strength material, and we prove the efficiency of hybrid finishing. We use Taguchi's experimental method to determine the influence of each parameter. Based on the results, US-MAP exhibited a higher polishing efficiency than traditional MAP, and a suitable frequency for hybrid finishing was 28 kHz. When investigating the effect of the parameters on the surface roughness, the ultrasonic amplitude had the greatest effect. However, when machining with 55-µm amplitude, the machining efficiency decreased as the magnetic flux density varied.

### 1. 서론

현대 사회에 들어 정밀한 가공을 요하는 첨단기술 제품이 출현함에 따라 초정밀 가공의 필요성이 점차 높아지고 있으며, 그에 따른 고경도 재료에 대한 수요가 증가되고 있다. 최근 산업에 활발히 사용되는 고경도 재료는 내열성, 내식성 등을 요구하는 세라믹 소재와 금형강 또는 공구강으로 사용되는 KP4,

NAK80, SKD11 등이 있다. 이러한 고경도 재료를 효과적으로 가공하기 위한 방법으로는 초음파 가공이 주로 사용되고 있다. Kang 등<sup>(1)</sup>은 초음파 가공에서 연마입자의 비율에 따른 가공특성을 연구하였고, Moon 등<sup>(2)</sup>은 초음파 공구흔의 형상에 따른 표면거칠기 향상정도를 연구하였으며, 평면가공에서 초음파 진동 가공의 효율성을 입증하였다. 그러나 제한적인 공구의 형상으로 인해 곡률 형상의 재료를 가공하는데 많은 제약이 따르므로, 형상에 유연하게 적용할 수 있는 표면정밀도 향상 기술이 필요하다. 이러한 목적을 달성하고자 제시된 방법 중 하나가 자력을 이용한 자기연마가공(Magnetic abrasive polishing)이다.

자기연마가공은 자기장에 의해 형성된 자기력선

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2015. 2. 25-27., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, [jskwak5@pknu.ac.kr](mailto:jskwak5@pknu.ac.kr)

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

방향으로 미세한 연마입자와 자성입자가 정렬하여 브러쉬 역할을 수행하며 금속표면을 연마하는 방법으로 공구의 형상이 유연성을 갖기 때문에 공작물 또는 가공부위의 형상에 구애를 받지 않는 장점을 지니고 있다.<sup>(3)</sup>

자기연마가공에 대한 연구로 Kim<sup>(4)</sup>은 공작물의 형상에 적용 가능한 자기연마 공구를 개발하고 실험을 통하여 그 효율성을 입증하였다. 또, Kim 등<sup>(5)</sup>은 비자성체의 자기연마에서 자기력 향상을 통해 연마효율을 증가시키는 방법을 제안하고, 그 효율성을 입증하였다. 그러나, 기존의 자기연마법의 경우 특수 합금강 스테인리스강 등과 같이 고경도 재료의 가공에서는 효율이 현저히 저하된다는 단점이 있다.

기존의 가공법에 새로운 제어기법의 적용을 통해 가공효율을 향상시키려는 연구가 다양한 형태로 진행되고 있다. Suzuki 등<sup>(6)</sup>은 2 축 진동을 이용한 초음파 가공(Ultrasonic machining)으로 초경의 표면가공 향상을 연구하였으며, Jung 등<sup>(7)</sup>은 알루미늄의 엔드밀 절삭가공에서 초음파 진동을 가하여 절삭능력의 향상을 확인하였고, 입력전압에 따른 표면거칠기 향상정도를 평가하였다. 또한 Kwak 등<sup>(8)</sup>은 ELID 연삭가공에서 초음파 진동테이블을 응용하여 절삭력의 향상을 확인하고, 복합가공에서 초음파의 가공효율 향상정도를 평가하였다. 그러나, 대부분의 초음파 가공은 절삭가공에 치중되어 있으며, 자기연마에 적용한 연구는 전무하다.

따라서 본 논문에서는 자기연마의 기계적인 한계를 극복하기 위해서 자기연마와 초음파 가공을 복합함으로써 기존의 초음파 가공에서 불가능한 난삭재의 3차원 형상 가공이 가능하게 하고 마찰가공과 진동 가공을 동시에 적용하여 높은 가공효율을 기대할 수 있는 초음파-자기연마 복합가공기술을 제시하고자 한다. 또 다구치 기법을 이용하여 초음파-자기연마 복합가공에 영향을 미치는 인자의 특성을 평가하고자 한다.

## 2. 초음파-자기연마 복합가공(US-MAP)

초음파-자기연마 복합가공은 자기연마와 초음파 가공이 복합된 새로운 형태의 마무리 공정이다. Fig. 1은 초음파-자기연마의 개략적인 장치의 구성을 나타낸 것이다. Fig. 2는 초음파-자기연마 복합가공 매커니즘의 개략도를 나타낸 것이다.

X, Y, Z 축 이동이 가능한 미세가공기와 그 축에는 공구와 자기력을 발생시킬 수 있는 인덕터가 설치되어 있으며, 피에조 진동자로 제작된 초음파

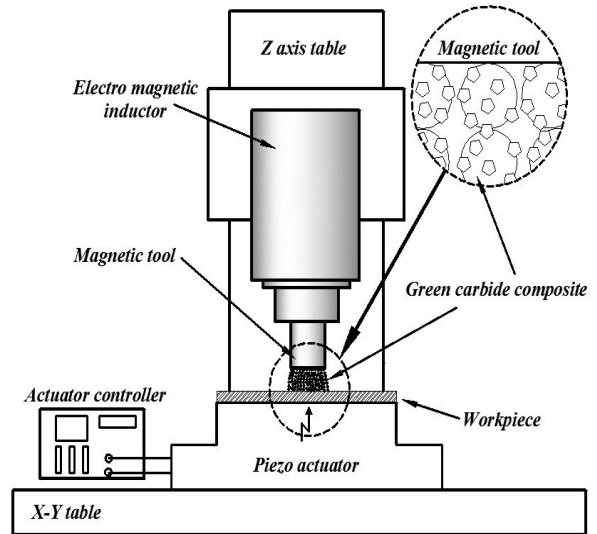


Fig. 1 Schematic diagram of US-MAP hybrid process

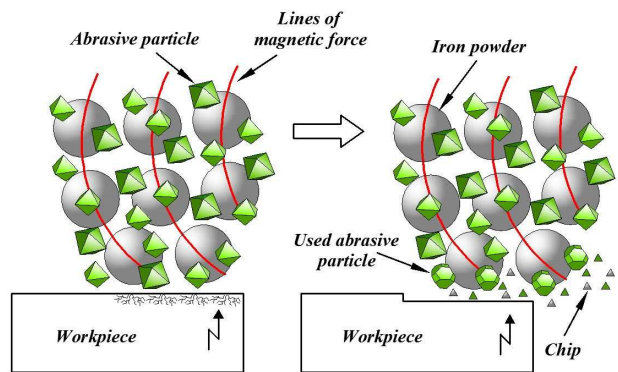


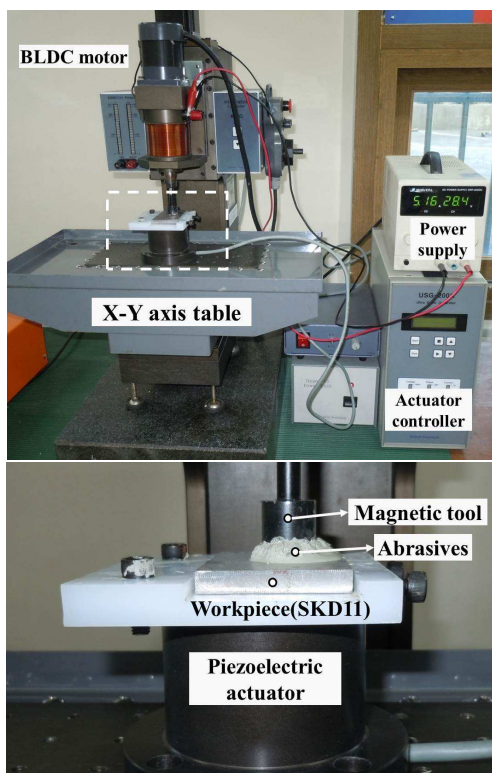
Fig. 2 Mechanism of US-MAP process

테이블에는 초음파 진동자의 컨트롤러가 연결되어 있다. 인덕터에 전류를 부가하면, 패러데이의 법칙에 의해 공구는 자기력을 발생하는 연마공구가 된다. 공구의 끝단과 공작물 사이에 간극을 주고 그 공간에 연마입자 혼합물을 슬러리 형태로 공급한다. 자기력이 부여된 연마공구는 연마입자 혼합물을 구속하게 된다. 이렇게 구속된 혼합물은 사슬 구조로 정렬되며, 유연성을 가진 공구가 된다.<sup>(9)</sup> 이러한 공구의 회전에 의해 기계적 가공이 이루어지며, 이와 동시에 공작물 하단에 설치된 초음파 테이블에서 진동으로 인한 충격력이 가공표면에 전달되어 복합적인 가공이 이루어진다.

초음파-자기연마 복합가공은 두 종류의 기계적 가공이 동시에 발생하므로 기존의 자기연마법보다 효율이 높으며, 초음파 진동에 의해 난삭재 가공에서도 높은 가공효율을 기대할 수 있다. 또한 유연성이 있는 공구를 사용하므로 공작물의 다양한 형상에 적용이 가능하며, 잔류응력이 거의 남지 않는다. 그리고 브러쉬 내에서 초음파 진동에

**Table 1** Experimental conditions for US-MAP

Items	Conditions
Workpiece	SKD11
Tool diameter	16mm
Working time	20min
Magnetic abrasives	GC(8 $\mu\text{m}$ ) + Fe(78 $\mu\text{m}$ ) + Mineral oil(200cst)
Mixing ratio (GC : Fe : Mineral oil)	2 : 2 : 1
Magnetic flux density	20, 40, 60mT
Spindle speed	400, 600, 800rpm
Frequency of ultrasonic	16, 28, 40kHz
Amplitude	11, 34, 55 $\mu\text{m}$
Working gap	1mm
Feed rate	10, 15, 20mm/min



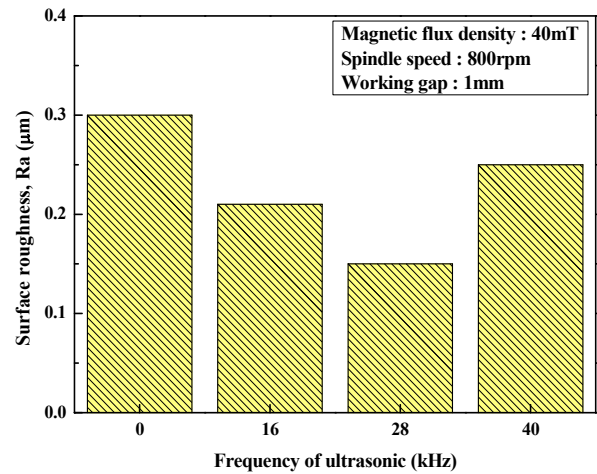
**Fig. 3** Component of US-MAP process

의해 연마입자의 순환효과가 개선되어 높은 가공 능력을 발휘할 수 있다.

### 3. 실험방법

초음파-자기연마가공 실험에서 사용된 공작물은 금형강인 SKD11이다. 공작물은 가공 전에 선 가공을 진행하였고, 평균 표면거칠기는 0.3 $\mu\text{m}$ 이다.

Table 1은 초음파-자기연마가공을 위한 실험조



**Fig. 4** Influence of frequency

건을 나타낸 것이다. 자속밀도와 공구의 회전속도는 각각 20, 40, 60mT와 400, 600, 800rpm이며, 진폭과 공구의 이송속도는 각각 11, 34, 55 $\mu\text{m}$ 와 10, 15, 20mm/min이다. 초음파의 주파수와 진폭은 각각 16, 28, 40kHz와 11, 34, 55 $\mu\text{m}$ 이다. 공구의 직경과 작업시간, 작업간극은 각각 16mm와 20분, 1mm로 모든 실험에서 동일하게 적용하였다.

Fig. 3는 초음파-자기연마의 실험장치들을 나타낸 것이다. 실험 후, 공작물표면의 임의의 점에서 표면거칠기를 5회 측정하고, 그 평균값으로 데이터의 신뢰도를 확보하였다.

## 4. 실험결과

### 4.1 초음파주파수의 선정

본 실험에 앞서 초음파 주파수를 선정하기 위하여 각각의 주파수 16, 28, 40kHz를 사용하여 동일한 조건에서 공작물의 표면거칠기 향상정도를 평가하였다.

Fig. 4는 주파수에 따른 표면거칠기를 나타낸 것이다. 전체적으로 초음파 진동이 부가된 자기연마가공이 기존의 자기연마가공 보다는 표면거칠기가 향상되는 것으로 나타났다. 특히 주파수가 28kHz에서 가장 많은 표면거칠기의 향상이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 그러나 주파수가 16, 28kHz에서는 표면거칠기의 향상이 크지 않음을 확인하였다. 이는 진폭이 크지만 초음파의 진동횟수가 적어 표면거칠기의 향상정도가 떨어진 것으로 판단된다. 또, 40kHz의 주파수를 사용하였을 경우, 초음파의 진동횟수는 많지만 진폭이 작아 가공면에 전달되는 충격력이 약하여 표면거칠기의 향상정도가 가장 적은 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서 최종 적으로 28kHz의 주파수를

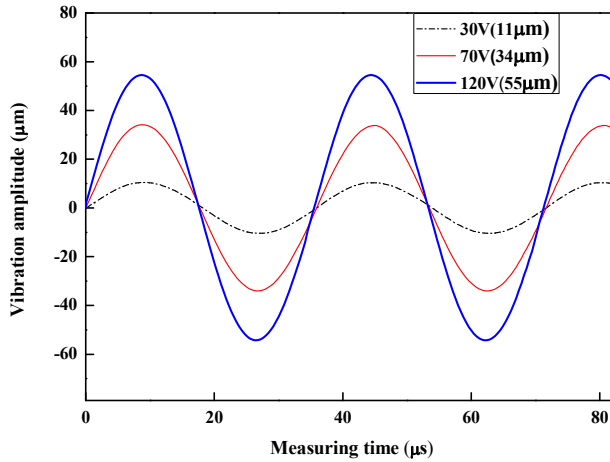


Fig. 5 Measured amplitude for input voltage of 30, 70, 120V at workpiece surface

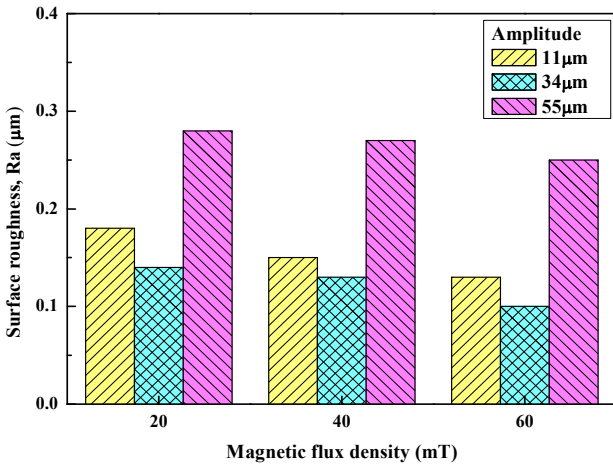


Fig. 6 Influence of magnetic flux density and amplitude

선정하여 실험을 실시하였다.

4.2 피에조 진동자의 진폭 특성

본 실험에 앞서 피에조 진동자의 진폭 특성을 알아보기 위하여 28kHz 의 주파수를 사용하여, 동일한 주파수에서 진동자 제어장치의 입력전압을 30, 70, 120V 로 변경하여 진폭을 측정하였다. 진폭 측정에 사용된 장비는 Mitutoyo 사의 SV-2000 을 사용하였고, 진폭의 측정범위는 최대 200μm 이다.

Fig. 5 는 입력전압이 각각 30, 70, 120V 일 때의 공작물 표면의 진폭을 측정된 것으로 입력전압에 따라서 각각 11, 34, 55μm 의 진폭이 측정되었다.

4.3 자속밀도와 초음파 진폭의 영향

공구의 자속밀도와 진폭이 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보기 위하여 자속밀도와 진폭을 각각 20, 40, 60mT 와 11, 34, 55μm 로 변화시키고 나머지 조건들은 동일하게 적용하여 실험을 진행하였다.

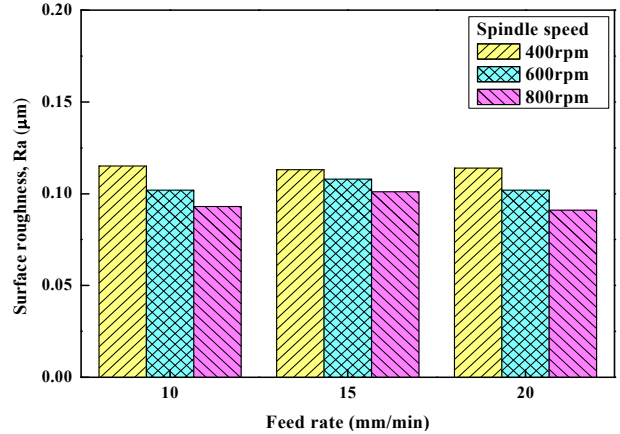


Fig. 7 Influence of spindle speed and feed rate of tool

Fig. 6 은 자속밀도와 초음파 진폭을 변화시켰을 때 표면거칠기를 나타낸 것이다. 진폭이 11, 34μm 일 때, 자속밀도가 증가할수록 가공 후 표면거칠기가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 또, 진폭이 11μm 일 때보다 34μm 일 때의 표면거칠기 향상정도가 더 많은 것을 알 수 있다. 그러나 진폭이 55μm 일 때, 표면거칠기의 향상이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 초음파의 진폭이 커질수록 연마입자에 의한 가공압력이 높아져 가공량이 증가하나 지나친 진폭은 오히려 자기연마가공을 방해하게 되어 표면거칠기의 변화가 적은 것으로 판단된다.

4.4 공구의 회전속도와 이송속도의 영향

공구의 회전속도와 이송속도가 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보기 위하여 공구의 회전속도와 이송속도를 각각 400, 600, 800rpm 과 10, 15, 20mm/min 으로 변화시키고 나머지 조건들을 고정하여 실험을 진행하였다.

Fig. 7 은 공구의 회전속도와 이송속도를 변화시켰을 때, 표면거칠기를 나타낸 것이다. 공구의 회전속도가 800rpm 이고, 이송속도가 20mm/min 일 때, 표면거칠기의 향상정도가 가장 많은 것으로 나타났다. 또, 공구의 이송속도와 회전속도가 증가할수록 표면거칠기 향상정도가 많아지는 경향을 보였다.

5. 인자 특성평가

본 연구에서는 초음파-자기연마 복합가공에서 각각의 인자들이 표면거칠기 향상에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실험계획법을 이용하였으며, 실험은 직교배열표를 구성하여 진행하였다.

**Table 2** Factors and levels used in experiment

Factors	Level		
	1	2	3
Magnetic flux density, A (mT)	20	40	60
Amplitude, B ( $\mu\text{m}$ )	11	34	55
Spindle speed, C (rpm)	400	600	800
Feed rate, D (mm/min)	10	15	20

**Table 3** Orthogonal array table for  $L_9(3^4)$

No.	Factors			
	A	B	C	D
1	20	11	400	10
2	20	34	600	15
3	20	55	800	20
4	40	11	600	20
5	40	34	800	10
6	40	55	400	15
7	60	11	800	15
8	60	34	400	20
9	60	55	600	10

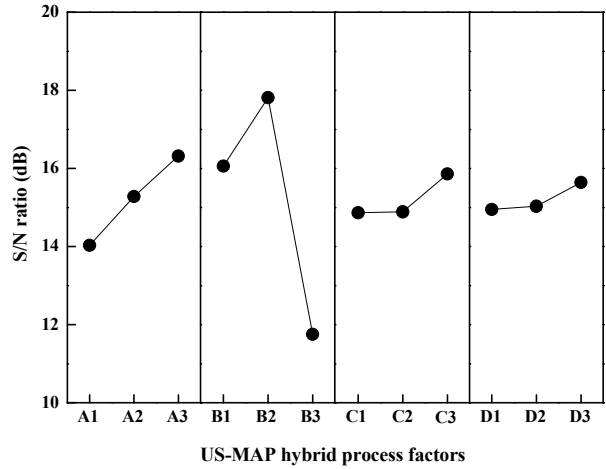
**Table 4** Experimental results and S/N ratio

No	Surface roughness after US-MAP, $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	S/N ratio(dB)
1	0.193	14.289
2	0.156	16.138
3	0.261	11.667
4	0.154	16.250
5	0.122	18.273
6	0.272	11.309
7	0.131	17.655
8	0.112	19.016
9	0.243	12.288

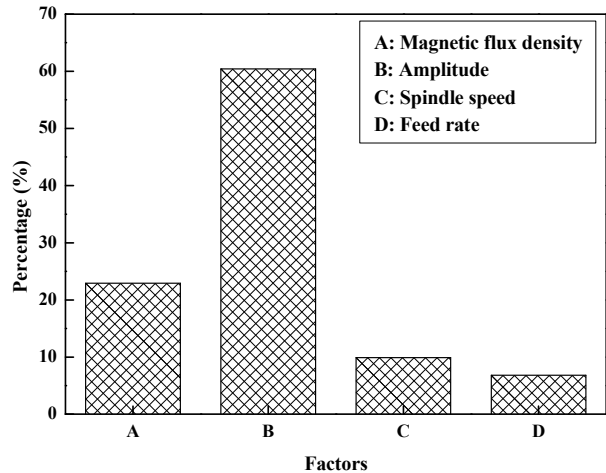
**Table 5** Result table of S/N ratio for each factor

		Level			Difference	Total
		1	2	3		
S/N ratio	A	14.03	15.28	16.32	2.29	10.02
	B	16.06	17.81	11.75	6.05	
	C	14.87	14.89	15.86	0.99	
	D	14.95	15.03	15.64	0.69	

Table 2는 본 연구에서 선택한 인자와 그 수준을 나타내고 있다. 초음파-자기연마 복합가공에서 기계적 절삭가공에 영향이 큰 자속밀도, 공구의 회전 속도, 이송속도와 초음파진동절삭에서 영향력이 큰 초음파의 진폭을 인자로 두어 실험을 진행하였다.



**Fig. 8** Influence of US-MAP process factors



**Fig. 9** Contribution of each factor

Table 3은 실험에 사용된  $L_9(3^4)$  표준 직교배열표를 나타낸 것으로 4개의 열에 주요 인자를 배치하고 실험은 9가지 조건으로 3회 반복 실시하였다.

Table 4는 실험 후 측정된 표면거칠기 값과 S/N비를 나타낸 것이다. 표면거칠기가 작을수록 좋은 데이터이므로 망소특성을 이용하여 S/N비를 얻었고, 망소특성의 S/N는 아래와 같다.

$$S/N = (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots) / n \quad (1)$$

Table 5는 S/N비를 이용하여 각 인자의 서로 다른 수준에서 특성치에 대한 영향력, 그리고 인자별 영향력의 차를 나타낸 것이다. Fig. 8은 인자의 영향력을 나타낸 것이다. 표면거칠기에 대한 최적 조건은  $A_3B_2C_3D_3$ 이다.

Fig. 9는 각 인자의 기여율을 나타낸 것이다. 초음파의 진폭(B)이 표면거칠기에 가장 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

**Table 6** Analysis of variance for US-MAP factors

	DOF	SS	V	F <sub>0</sub>
A	2	0.00256	0.00128	11.67*
B	2	0.02728	0.01364	123.64**
C	2	0.00067	0.00033	3.05
D	(2)	(0.00022)	(0.00011)	
Error	2	0.00022	0.00011	
Total	8	0.03074		

Table 6은 각 인자들이 특성치에 미치는 영향을 평가하기 위한 분산분석표로, 가장 영향력이 적은 인자(D)를 풀링(pooling)하였다. F-검증을 통하여 자속밀도(A)와 진폭(B)이 각각 90%(F( $\alpha=0.1$ )=9.33)와 95%(F( $\alpha=0.05$ )=19.4)의 신뢰수준 범위 내에 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 자속밀도의 크기에 따라 자기장 내에 구속되는 연마입자의 혼합물이 형성하는 브러쉬의 강도가 달라지고, 가공압력이 증가하여 원활한 가공이 이루어지기 때문이다. 또, 초음파의 진폭에 따라 자기연마 가공효율이 저하 또는 향상되기 때문에 두 인자는 가공에 영향이 큰 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 공작물 표면에 초음파 진동을 인가하여 자기연마와 초음파 가공이 복합되어 있는 초음파-자기연마 복합가공을 연구하고, 인자의 기본적인 특성연구와 실험계획법을 활용하여 각 인자별 특성과 수준별 영향력을 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 초음파 진동을 부가한 자기연마는 기존의 자기연마 보다 공작물의 표면거칠기가 향상됨을 실험을 통하여 확인하였다.

(2) 초음파 진동의 충격력과 가공효율을 비교하였을 때, 주파수 28kHz를 사용하는 것이 가장 적합하였다. 또한 진폭이 11, 34 $\mu$ m일 때, 가공 후 표면거칠기가 향상되었다. 그러나 진폭이 55 $\mu$ m일 때, 표면거칠기의 향상이 매우 적음을 확인하였다.

(3) 다구치 기법을 이용하여 인자특성분석을 한 결과, 초음파의 진폭이 공작물의 표면거칠기에 가장 많은 영향력을 미치는 것을 확인하였다. 반면에 이송속도는 표면거칠기에 가장 적은 영향을 미침을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로

한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (CD20140805).

## 참고문헌

(References)

- (1) Kang, I. S., Kang, M. C., Kim, J. S., Kim, K. H. and Seo, Y. W., 2003, "A Study on the Ultrasonic Machining Characteristics of Alumina Ceramics," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 2, No. 1, pp. 32~38.
- (2) Moon, H. H., Park, B. G., Lee, C. H. and Kim, S. C., 2003, "A Study on the Surface Roughness of Ceramics According to Ultrasonic Polishing," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 2, No. 1, pp. 15~21.
- (3) Kwak, J. S., 2009, "Enhanced Magnetic Abrasive Polishing of Non-ferrous Metals utilizing a Permanent Magnet," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 7~8, pp. 613~618.
- (4) Kim, J. D. and Choi, M. S., 1997, "Study on Magnetic Polishing of Free-form Surface," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 8, pp. 1179~1187.
- (5) Kim, S. O. and Kwak, J. S., 2008, "Magnetic Force Improvement and Parameter Optimization for Magnetic Abrasive Polishing of AZ31 Magnesium Alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 18, No. 1, pp. 369~373.
- (6) Suzuki, H., Hamada, S., Okino, T., Kondo, M., Yamagata, Y. and Higuchi, T., 2010, "Ultraprecision Finishing of Micro-spheric Surface by Ultrasonic Two-axis Vibration Assisted Polishing," *International Journal of the College International pour la Recherche en Productique*, Vol. 59, pp. 347~350.
- (7) Jung, M. W., Kwak, T. S., Kim, M. K. and Kim, G. H., 2014, "Effects of Ultrasonic Vibration on Machined Surface of Aluminium 6061 in Endmill Cutting Process," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 96~102.
- (8) Kwak, T. S., Jung, M. W., Kim, G. H. and Kwak, I. S., 2013, "The Effect of Ultrasonic Vibration Table on ELID Grinding Process of Aluminium Nitride Ceramics," *Journal of the Korean Society for Precision Engineers*, Vol. 30, No. 12, pp. 1237~1243.
- (9) Park, S. J., Ahn, B. W. and Lee, S. J., 2004, "Nano-scale Precision Polishing Characteristics using a Micro Quill and Magnetic Chain Structure," *Journal of the Korean Society for Precision Engineers*, Vol. 21, No. 8, pp. 34~42.