경사면의 자기연마가공 특성평가 및 표면거칠기 예측모델

이정인† · 김상오† · 곽재섭#
부경대학교 대학원† · 부경대학교 기계공학부#
(2008. 8. 5. 접수 / 2008. 11. 21. 채택)

Assessment on magnetic abrasive finishing of inclined surface and prediction model for surface roughness

Jung-In Lee† · Sang-Oh Kim† · Jae-Seob Kwak#
Graduate School of Mechanical Engineering, Pukyong National University · Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University
(Received August 5, 2008 / Accepted November 21, 2008)

Abstract : In order to satisfy the customer's variant needs for a product quality in recent years, a demand for developing higher precision machining technologies in a lot of application areas such as automobile, cellular phone and semiconductor has been increased more and more. Micro-magnetic induced polishing(μ-MIP) process is one of these precision technologies. In this study, to verify the parameters' effect of the μ-MIP process on the surface roughness improvement of the inclined workpiece, well planned experiment which was called the design of experiments was carried out. Considered parameters were spindle speed, inductor current, abrasive configuration and working gap between the workpiece and the solid tool. As a result, it was seen that the inductor current and the working gap greatly affected the surface roughness improvement. And to predict the surface roughness of the inclined workpiece, S/N ratio and first-order response surface model was developed.
Key Words : magnetic abrasive polishing, design of experiments, S/N ratio, first-order response surface

1. 서 론

산업이 발전됨에 따라 고정도, 고품질의 부품을 요구하는 경향이 커지고, 기계적 성질이 우수한 특수합금강, 알루미늄합금, 표면 경화강 등의 난삭재들이 기계부품 및 각종 설비용 부품으로 사용되고 있다. 따라서 그 품질을 향상시키기 위해 제품의 마무리 가공공정에 적용되는 연삭가공의 중요성은 더욱 더 증대하고 있다.

그러나 연삭가공은 공작물의 형상이나 재질에 따라 가공이 불가능 하거나 일정한 품질의 제품을 얻을 수 없는 단점을 지니고 있다.

예를 들어 직경이 매우 작은 파이프 내면의 연마가공은 파이프의 길이가 길어지면 내면의 연마가공이 매우 어려워진다. 또한 복잡한 형상을 갖는 금형(Mold)의 연마가공은 그에 맞는 전용 숫돌의 제작이 불가능하기에 현재에도 수작업에 의존하고 있다.[1)]

이러한 한계를 극복하고자 제시된 방법 중 하나가 전자석을 이용한 자기연마법이다. 자기연마법은 자기장에 의에 형성된 자력선 방향으로 미세한 연마 입자와 자성입자가 정렬하여 브러쉬(Brush) 역할을 수행한다.[2-3)]

이러한 브러쉬가 금속표면을 연마하는 방법으로 공구의 형상이 유연성을 갖기 때문에 공작물 또는 가공부위의 형상에 구애를 받지 않는 강점을 지니고 있다. 기존의 자기 연마 방법은 가공 대상의 전체 영역을 가공하기에는 적합하지만, 특정 미소 영역의 단차나 경사가 있는 부분을 작업하기는 어려운 점이 많다. 그 중 경사면에 대한 효율적인 연마방법은 그 연구가 미진하다. 따라서 경사면의 연구

교신저자 : 부경대학교 기계공학부
E-mail : jskwak@pknu.ac.kr

가 이루어지고 더 나아가 자유곡면 연마에 대한 연구가 진행 된다면 금형과 같은 복잡한 형상의 제품의 자동 연마가공이 이루어 질 수 있게 될 것으로 보인다.

따라서 본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 경사면의 자기연마 특성을 평가하고, S/N비와 1차 반응 표면 모델을 이용하여 예측모델을 제시하였다.

2. 자기연마의 이론적 배경

자기연마법의 개략적인 가공기구는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1과 같이 Steel Pole에 코일을 감고 그 코일에 전류를 부가하면, 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 의해 자기력이 발생하는 연마공구가 된다. 공구의 끝단과 공작물 사이에 간극을 주고 그 공간에 자성체와 연마입자를 용융하여 분쇄한 일체형 입자 또는 자성입자와 연마입자를 일정 비율로 혼합한 혼합형 입자를 슬러리 형태로 공급한다. 전자석에 전류가 부가된 연마공구는 자성입자를 구속하게 된다. 이렇게 구속된 자성입자는 사슬구조(Chain-like structure)로 정렬되며 자성입자의 정렬로 인하여 연마 입자는 자성입자들 사이에 위치한다. 이처럼 사슬구조로 형성된 입자들은 유연성을 가지는 브러쉬 역할을 수행한다.[4)]

Fig. 2와 같이 일체형 자기연마입자 1개는 코일에서 발생되는 자력에 의한 법선 방향의 힘 Δf_n , 공구의 회전에 의해 발생하는 접선 방향의 힘 Δf_h를 받는다. 그리고 발생하는 자력은 자속의 밀도에 따라 증감한다.

자속밀도는 자기장 안의 어떤 점에서 자기장에 수직인 단위면적당의 자기력선의 수를 나타낸다.

즉, 전류의 세기가 증가할수록 자속밀도는 증가하기 때문에 식(1)의 관계가 성립한다.

$$B = \mu H \qquad (1)$$

여기에서 B 는 자속밀도(Tesla), μ 는 투자율(H/m), H 는 자장의 세기(A/m)를 나타낸다. 또한 자속밀도는 자장의 세기에 따라 이력곡선(Hysteresis loop)을 따른다.

3. 실험장치

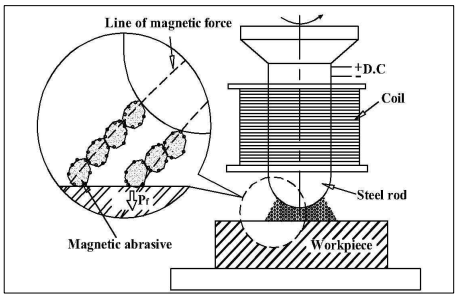

Fig. 1. Schematic of magnetic abrasive polishing

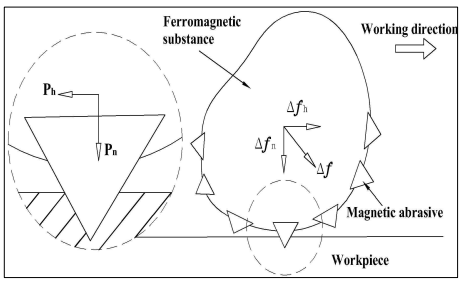

Fig. 2. Configuration of magnetic abrasive polishing

3.1 장치 구성

본 연구의 실험을 위하여 자기연마 시스템을 구성하였다. 자기연마 시스템은 코일에 의한 전자석 역할을 수행하는 인덕터와 이곳에 전류를 공급하는 전원 공급장치 및 X-Y축 이송 제어장치로 구성되어 있다. 상세한 자기연마 장치의 구성 및 사양은 Table 1에 나타내었다. 여기서 공구 역할을 하는 인덕터는 공구의 헤드의 형상에 따라 ball type과 flat type으로 나눈다. 본 실험에서는 넓은 면적의 자기연마를 위해 ball type를 선정하여 사용하였다. 그리고 공급된 전류에 의해 자화된 전자석의 자속밀도는 최대 0.2T 이다. 공작물의 재질은 SM45C로 선정하였다.

Table 1 conditions of μ-MIP equipments

Items	Conditions
Motor	AC servo motor (0 ~ 60Hz)
Inductor	Ball end, flat end
Magnetic flux density	0 ~ 0.2T
Power supply	5A , 50V
X - Y axis control drive	0~12m/min
Feed Speed	9m/min
Surface roughness tester	Surftester 301 (Mitutoyo)

4. 경사면의 자기연마

4.1 실험목적 및 방법

자기연마 장치를 이용하여 자유곡면의 경로는 따르지 않고 주어진 가공인자의 조절로 자기연마 가공이 가능하도록 하기위한 기초연구로써 경사면의 자기연마 특성을 평가하고자한다. Fig. 3은 실험을 통해 얻어지는 표면거칠기의 측정 방법을 나타내고 있다. 공구와 가장 가까운 거리에 위치한 m_1지점부터 가장 먼 거리의 m_3지점까지 3개의 점에 대해 그 표면거칠기의 향상 정도를 계산한다.

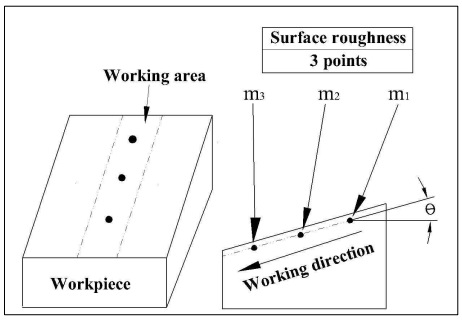

Fig. 3. Influence of S/N ratio on surface roughness(ΔRa)

4.2 실험 및 결과

실험계획법에 의한 실험을 위하여 각각의 요소와 그에 대한 레벨 값을 table 2와 같이 구성하였다. 이때 기울기는 1도에서 3도로 조정하여 실험하며 입자의 종류 대신 입자의 크기를 평가에 반영하였다. 이것은 평면의 자기연마 특성평가에서 입자의 크기가 작은 입자를 가질수록 표면거칠기의 향상에 큰 영향을 미침을 알았기 때문이다. 공구의 회전수는 입자의 이탈을 방지하기 위해 1000rpm 이하로 선택하였다.

Table 2 Factors and levels used in experiment

Factor	Level		
	1	2	3
Rotational speed, A (rpm)	700	800	900
Current, B (A)	1	1.5	2
Angular, C (°)	1	2	3
Abrasive, D (㎛)	50	150	200

Table 3 Orthogonal array table for L9(3^4)

No.	Factor			
	A	B	C	D
1	700	1	1	50
2	700	1.5	2	150
3	700	2	3	200
4	800	1	2	200
5	800	1.5	3	50
6	800	2	1	150
7	900	1	3	150
8	900	1.5	1	200
9	900	2	2	50

Table 4 Experimental result and calculated S/N ratio

No	m1	m2	m3	m1SN	m2SN	m3SN
1	0.29	0.15	0.02	-10.752	-16.478	-33.979
2	0.56	0.24	0.02	-5.0324	-12.395	-33.979
3	0.52	0.14	0.08	-5.6799	-17.077	-21.938
4	0.31	0.12	0.09	-10.172	-18.416	-20.915
5	0.47	0.25	0.04	-6.5580	-12.041	-27.958
6	0.38	0.13	0.01	-8.4043	-17.721	-40.000
7	0.36	0.3	0.19	-8.8739	-10.457	-14.424
8	0.47	0.66	0.4	-6.5580	-3.6091	-7.9588
9	0.59	0.25	0.23	-4.5829	-12.041	-12.765
Total	3.95	2.24	1.08	-66.6134	-120.235	-213.916

Table 3은 본 실험에 사용된 $L_9(3^4)$ 표준직교배열표를 나타낸 것이다. Table 4는 3지점에 대한 표면거칠기의 향상정도와 망대특성을 이용한 S/N비 값을 나타내고 있다.

결과에서 보듯이 m_1~m_3지점에 따라 각각의 인자들이 미치는 영향력의 정도가 다르게 나타난다. 먼저 m_1지점에서는 Fig. 4와 같이 기울기의 각도에 따른 영향력이 가장 크고 입자의 크기가 미치는 영향이 가장 작음을 알 수 있다. 반면 중간 지점인 m_2지점에서는 공구의 회전수와 기울기가 거의 유사한 영향력을 가지고 있다. 마지막으로 공구와의 거리가

가장 먼 m_3지점에서는 회전수의 영향력이 가장 크며 기울기에 대한 영향력이 가장 작음을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 공구와 공작물 사이의 간극에 따른 영향으로 볼 수 있다. 공구와 공작물 사이의 거리가 짧을 경우 각도에 따라 거리가 급격히 변화하므로 기울기의 각도에 대한 영향력이 크며 반대로 거리가 길수록 거리에 따른 영향력이 급격히 감소하여 각도에 대한 영향력 보다는 다른 인자들의 영향력이 크게 작용함을 알 수 있다. 각 점에 대한 최적의 조건은 m_1지점에서는 A2B1C1D3이며, m_2지점에서는 A2C3C3D1일때 마지막으로 m_3지점에서는 A1B3C1D2이다. Table 5~7은 각 지점에 대한 분산분석표를 나타내고 있으며 가장 영향력이 작은 항을 각각 오차항으로 폴링하였다.

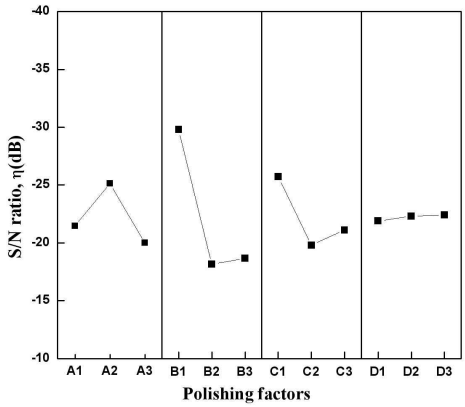

Fig. 4. Influence of S/N ratio on surface roughness(ΔRa) at m_1 point

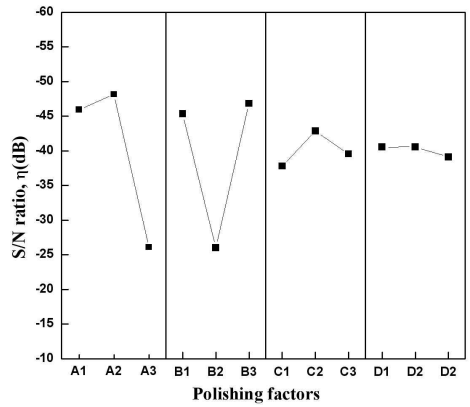

Fig. 5. Influence of S/N ratio on surface roughness(ΔRa) at m_2 point

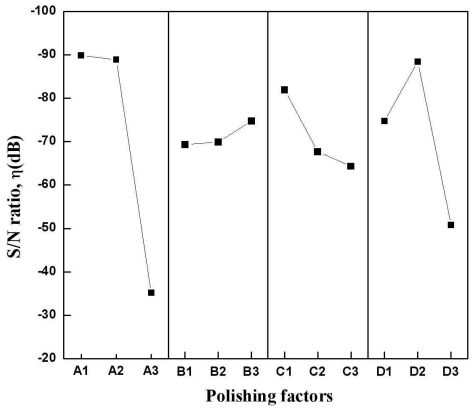

Fig. 6. Influence of S/N ratio on surface roughness(ΔRa) at m_3 point

Table 5 ANOVA for S/N ratio at m_1 point

	SS	DOF	V	F0
A	4.641621	2	2.32081	91.82985**
B	28.86839	2	14.4342	571.1325**
C	6.444503	2	3.222251	127.4981**
D	0.050546	2	0.025273	-
Error	(0.050546)	(2)	(0.025273)	-
Total	39.95452	8		

Table 6 ANOVA for S/N ratio at m_2 point

	SS	DOF	V	F0
A	98.42732	2	49.2137	206.47**
B	72.46822	2	36.3841	152.65**
C	4.3684	2	2.17422	9.17*
D	0.4767	2	0.2383	-
Error	(0.4767)	(2)	(0.2383)	-
Total	176.0407	8		

Table 7 ANOVA for S/N ratio at m_3 point

	SS	DOF	V	F0
A	653.8581	2	326.92	112.24**
B	5.8251	2	2.9125	-
C	58.3714	2	120.64	41.423**
D	241.2981	2	29.185	10.020*
Error	(5.8251)	(2)	(2.9125)	-
Total	953.52	8		

5. 표면거칠기 예측모델

중합반응에서 각 인자들의 수준변화에 따른 결과값을 예측하고 이를 활용하기 위하여 예측모델을 개발하고자 한다. 본 연구에서는 두 가지 예측모델을 개발하여 비교분석하였다. 먼저 직교배열표에 따라 측정된 결과값의 S/N비를 이용하여 각 특성치들에 대한 예측값을 산출 할 수 있다.

인자들의 서로 다른 수준 조합에서의 각 특성치들의 S/N비(η_{Sn})를 아래와 같이 예측할 수 있다.

$$\eta_{Si} = \bar{\eta}_{Si} + (A_i - \bar{\eta}_{Si}) + (B_j - \bar{\eta}_{Si}) + (C_k - \bar{\eta}_{Si}) + (D_l - \bar{\eta}_{Si})$$
$$= -3 \cdot \bar{\eta}_{Si} + (A_i + B_j + C_k + D_l) \quad (2)$$

여기서 $\bar{\eta}_{Si}$ 은 각 특성치의 S/N비의 평균치이고, A_i, B_j, C_k, D_l는 각 인자가 서로 다른 수준에서의 특성치에 대한 영향력이다. i, j, k, l는 각각 1, 2, 3이다. 식 (2)를 이용하여 각각의 인자들의 S/N비를 대입하여 각 실험의 결과값을 예측할 수 있다.

S/N비를 이용한 예측방법과 함께 예측하는 또 다른 방법으로 반응표면분석기법을 이용할 수 있다. 반응표면모델의 개발에 있어서 얻고자 하는 반응표면과 관련 변수들이 선형적인 관계를 가질 때는 1차 반응표면모델로 가정하고, 반응표면과 변수들이 곡선적인 관계를 가질 때는 2차 반응표면모델을 구하여야 한다. 본 연구에서는 실험 횟수를 감안하여 변수들이 선형적인 관계를 가진다고 가정하고 1차 반응표면 모델을 선택하였다.

각 인자에 대한 결과값을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Result = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D \quad (3)$$

여기서 A, B, C, D는 각각 공구의 회전수, 공작물의 기울기, 전류의 세기, 자기연마 입자의 종류를 의미한다. 계수행렬 $[\beta]$는 다음과 같이 구할 수 있다.[4]

$$[\beta] = ([X'][X])^{-1}[X'][Y] \quad (4)$$

여기서 $[X]$는 각 실험조건으로 구성되는 행렬이고, $[Y]$는 실험에서 얻어진 특성치들의 값으로 구성되는 행렬이다. 계수행렬$[\beta]$는 실험조건과 실험에서 얻어진 특성치를 식 (4)에 대입하면 각 인자들로부터 얻을 수 있다. 그리고 각 계수들을 식 (3)에 의해 다음과 같이 m_1, m_2, m_3 지점에 대한 각각의 1차 반응표면 모델을 얻었다.

$$\Delta Ra(m_1) = 0.0957 + 0A + 0.1767B + 0.0524C - 0.0002D \quad (5)$$

$$\Delta Ra(m_2) = -0.7041 + 0.0011A - 0.0167B + 0.0028C - 0.0005D \quad (6)$$

$$\Delta Ra(m_3) = -0.8911 + 0.0012A + 0.0067B + 0.0022C - 0.0005D \quad (7)$$

Fig. 7~9는 S/N비를 이용한 예측값과 1차 반응 표면 모델을 이용한 예측값의 결과를 도표로 비교하고 있다. 그래프에서와 같이 경사면의 자기연마에서 표면거칠기의 향상정도는 S/N비를 이용하여 각 실험에 대해 예측하였을 때 거의 실험값과 일치함을 알 수 있다.

이는 m_1, m_2, m_3에서의 자기연마 가공 시 가장 영향력이 적은 자기연마 입자와 각도가 실제 실험에 영향력을 미치지 못했기 때문이다. 따라서 실험이 매우 정확히 이루어 졌음을 알 수 있다. 그리고 1차 반응표면모델을 이용한 예측값은 각 실험 점에 대해 실제값과 다소 차이가 있지만 거의 유사하게 예측되고 있다.

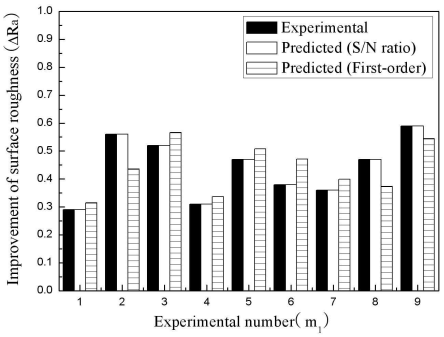

Fig. 7. Comparison between experimental and predicted improvement of surface roughness at m_1

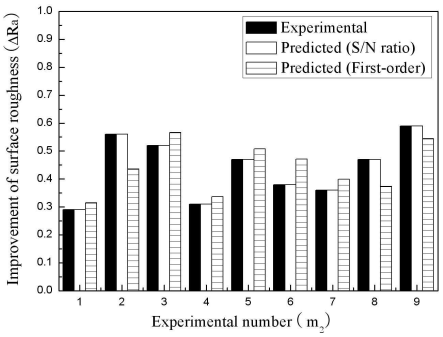

Fig. 8. Comparison between experimental and predicted improvement of surface roughness at m_2

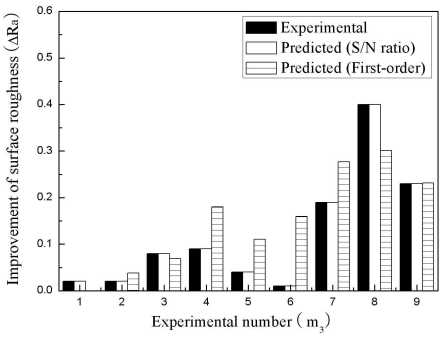

Fig. 9. Comparison between experimental and predicted improvement of surface roughness at m_3

따라서 이번 실험에서는 S/N비를 이용한 예측모델이 1차 반응표면모델보다 정확함을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 자유곡면의 효율적인 자기연마를 위한 기초실험으로 기울기면에 대한 자기연마의 특성을 실험계획법을 통해 평가하고, 표면거칠기의 예측 모델을 제시하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 기울기면의 자기연마에서 공구와 공작물 사이의 거리가 가장 가까운 지점(m_1)의 표면거칠기의 향상은 전류의 량에 가장 많은 영향을 받은 반면, 거리가 가장 먼(m_3) 지점에서는 공구의 회전수가 가장 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

(2) 기울기면의 표면거칠기 향상에 대한 예측모델에서 S/N비를 이용한 예측모델이 1차 반응표면모델보다 매우 정확한 예측값을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업(과제명:Pre-polymer 중합설비 설계 및 시스템 최적화기술 개발, 과제번호: 20070130134117)으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

1) M. S. Choi, J. D. Kim, 1995, Study on the Rapid Magnetic Polishing System of Free-Surface Die/Mold, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, pp. 102~107

2) W. G. Park, T. W. Roh, Y. I. Seo, H. Choi, J. C. Lee, S. H. Jung, S. Chae, 2001, "The internal Finishing Characteristics of Non-ferromagnetic Pipe Polished by Magnetic Abrasive Machining (Ⅱ)", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, pp.960~963

3) C. R. Cho, S. R. Park, S. C. Yang, Y. G. Jung, 2004, A Study on the Improvement of Performance of High Speed Cutting Tool using Magnetic Fluid Grinding Technique (1st Report), Production of Experimental Equipment, Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 135~138

4) H. N. Kim, S. K. Song, Y. K. Yun, H. W. Kim, B. S. Kim, H. J. Ahn, J. W. Shim, 2003, The Effects of Ba-Ferrite Magnetic Abrasive Behavior on Polishing Characteristics, Journal of the Korean Society of Precision Engineering