

마그네슘 합금강의 제2세대 자기연마에서 표면거칠기 예측모델 개발

김상오* ·이성호** ·곽재섭*†

* 부경대학교 기계공학과, ** POSCO

Development of Prediction Model and Parameter Optimization for Second-Generation Magnetic Abrasive Polishing of Magnesium Alloy

Sang Oh Kim*, Sung Ho Lee** and Jae Seob Kwak*†

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

** POSCO

(Received November 24, 2010 ; Revised February 7, 2011 ; Accepted February 7, 2011)

Key Words: Magnetic Abrasive Polishing(자기연마), Response Surface Model(반응표면모델), Non- Magnetic Material(비자성체)

초록: 본 연구에서는 AZ31B 마그네슘 합금 평판 연마에 제 2세대 자기연마공정을 적용하고 실험계획법을 통해 공정인자들의 특성을 평가하였으며, 2차 반응표면모델을 이용한 표면거칠기 예측모델을 개발하였다. 비자성체 재료의 기존 자기연마 공정에서는 재료의 표면에서 자기력이 낮아 표면거칠기의 향상에 효율이 낮은 단점을 가진다. 이를 보완하기 위하여 전자석 배열을 이용한 자기력 테이블을 자기연마 공정에 적용하여 비자성체 표면의 자기력을 향상시킬 수 있었다. 이러한 시스템을 제 2세대 자기연마라 일컫고, 실험계획법에 따른 공정 인자 평가 결과, 자기력 테이블의 전자석 세기가 AZ31B 평판의 표면 거칠기 향상에 가장 큰 영향을 가지고 있음을 확인했다. 또한 자기력 테이블과 공구의 회전속도에 따른 반응표면모델을 개발함으로써 마그네슘 자기연마 공정의 효율성을 높일 수 있었다.

Abstract: The conventional method of magnetic abrasive polishing is not suitable for non-magnetic materials because such polishing is basically possible when magnetic force exists and the magnetic force in non-magnetic materials is very low. The installation of an electromagnet under the working area of a non-magnetic material, which is called second-generation magnetic abrasive polishing in this study, can enhance the magnetic force. Experimental evaluation and optimization of process parameters for polishing magnesium alloy steel was performed by adopting the design of experiments and the response surface method. The results indicated that the intensity of the magnetic force and spindle speed are significant parameters that affect the improvement of surface roughness. A prediction model for the surface roughness of the magnesium alloy steel is developed using the second-order response surface method.

- 기호설명 -

1. 서론

F_m : 법선방향 절삭력(N)

F_h : 접선방향 절삭력(N)

F_t : 연마입자의 절삭력(N)

M_t : 연마입자의 모멘트(N · m)

R^2 : 결정계수

마그네슘은 밀도가 1.74g/cm³으로 실용금속 중 가장 가벼운 금속으로 알려져 있다. 뿐만 아니라 비강도, 치수안정성, 기계가공성, 진동흡수성 및 전자파 차폐성이 우수하여 수송 기계 및 전자제품 등의 구조용 재료로 각광 받고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 마그네슘 자체가 지니는 높은 산화성 및 폭발성 그리고 해수 및 대기에 의한 내식성 불량은 마그네슘 합금의 사용범위를 제한시키고 있다. 이러한 단점의 보완을 위해 반드시 표면처리가 필요

† Corresponding Author, jskwak5@pknu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

한 실정이다. 특히, 마그네슘 합금을 이용한 제품 재료의 경우 매우 얇은 두께를 지니는 판재제품이 대다수이다. 이 같은 재료는 특성상 효과적인 표면처리를 위한 연마 가공이 매우 어렵고 폭발성의 위험이 산재해 있다. 따라서 위와 같은 문제점들을 해결함과 동시에 고품위의 표면을 얻기 위하여 마그네슘 합금의 자기연마법 개발이 진행되고 있다.

자기연마법은 기존의 연마방법과 다르게 매우 유연성을 지닌 공구를 사용하여 연마하는 방식이다. 자기연마입자는 전자기장의 영향으로 공작물과 공구사이에 브러쉬 형태로 배열되고, 공구의 회전력에 의해 연마공정을 수행한다.⁽⁴⁾ 가공은 공구의 회전력과 코일에 인가되는 전류에 의해 생성되는 자기력에 의해 진행되기 때문에 자기력의 세기는 자기연마의 성능과 매우 밀접한 관계를 가진다. 선행 연구를 통하여 전류의 공급량이 클수록 표면거칠기 및 MMR(금속제거율)이 개선된다는 것을 확인 할 수 있었다.⁽⁵⁾ 그러나 알루미늄이나 스테인레스 강과 같은 비자성체의 자기연마 공정에서는 자성체보다 자기연마 공정의 효율이 현저히 감소한다. 따라서 비자성체의 자기연마에서는 자기력 향상을 위해 영구자석을 이용하는 방안이 연구되었으며, 그 효과를 검증하였다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 효율적인 자기력 향상과 제어를 위해 전자석을 이용한 어레이 테이블이 적용된 2세대 자기연마 공정을 마그네슘 합금 판재의 연마 공정에 적용하였으며, 자기연마 공구의 자기력과 어레이 테이블에 발생하는 자기력의 세기가 마그네슘 합금의 표면거칠기 향상에 미치는 영향을 실험계획법을 통해 평가하였다. 또한 반응표면기법을 통해 공구의 회전수, 테이블의 자기력 세기 그리고 공구의 자기력 세기간의 표면거칠기 향상에 대한 예측 모델을 개발하였다.

2. 제 2세대 자기연마

2.1 제 2세대 자기연마 특성

비자성체의 자기연마공정에서는 Fig. 1과 같은 가공 메커니즘을 보인다. 우선 Fig. 1(a)와 같이 자기력향상을 위한 방안이 적용되지 않은 경우, 공작물의 표면에서 철 입자와 같은 자성 입자가 연마입자에 가공에 충분한 법선력(F_m)을 전달하지 못하여 연마입자의 모멘트(M_t)를 증가시킨다.

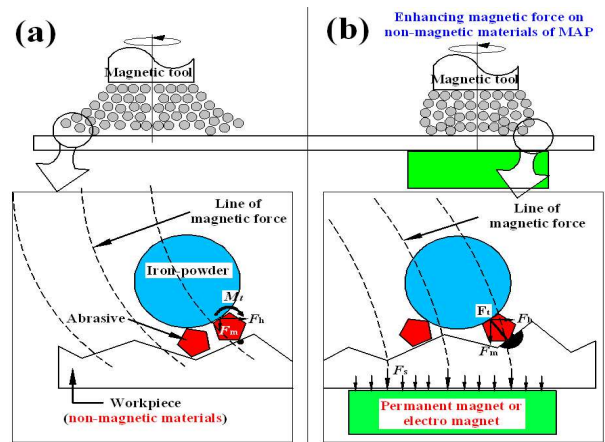


Fig. 1 Schematic of polishing mechanism on MAP (Magnetic Abrasive Polishing) of non-magnetic material

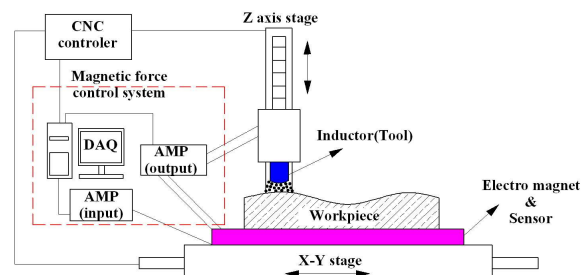


Fig. 2 Schematic of second generation magnetic abrasive polishing process⁽⁷⁾

그 결과 효율적인 가공을 할 수 없다. 반면, Fig. 1(b)와 같이 영구자석이나 전자석을 이용한 경우 연마입자가 공작물 아래에서 발생한 자기력에 의해 충분한 법선력을 가지게 되어 효율적인 가공을 할 수 있다. 2세대 자기연마는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 복잡한 자유곡면에 적용이 가능한 구성으로 되어 있을 뿐 아니라 전자석을 이용한 어레이 테이블이 공작물 아래에 설치되어 모든 비자성체의 표면 정밀가공에도 적용 될 수 있는 특징을 가진다.

2.2 다중 배열 전자석 테이블

비자성체의 2세대 자기연마 공정에서의 자기력 향상을 위해 전자석을 이용한 어레이 테이블을 Fig. 3과 같이 설치하였다. 총 32개의 전자석이 일정한 간격으로 정렬되어 있으며, 각 전자석은 직경 30mm로 구성된다. 1개의 전자석은 최고 0.08A의 전류가 인가되며, 이때 최고 30mT의 자기력을 가진다. 그러나 여러 개의 전자석이 동시에 같은 극성으로 자기력을 형성할 경우, 자기력

선 간의 간섭이 발생하여 오히려 자기력이 감소하는 경향을 보인다.

본 연구에서는 이러한 현상을 줄이고 2세대 자기연마 공구경로에 따라 집중적인 자기력 향상을 위한 방안을 실험을 통해 제시하였다. Fig. 4는 9개의 전자석 배열에서 중심부(작업 영역)에서의 자속밀도 향상을 위한 실험 방법을 나타내고 있다. 실험의 결과 Fig. 5와 같이 중심을 제외한 나머지 8개의 전자석 극성이 반대일 때 최고 47mT로 가장 높은 자속밀도를 형성할 수 있다. 여기서 (-)의 의미는 S극성을 의미한다. 본 연구에서는 이와 같은 방법을 적용하여 마그네슘 합금의 자기연마 특성평가 실험을 수행하였다.

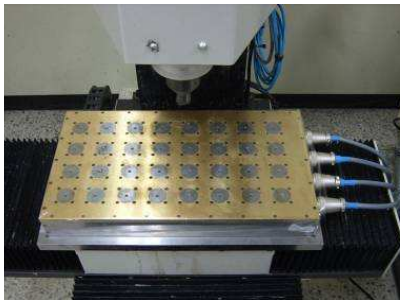


Fig. 3 Photography of installed electro-magnet array table

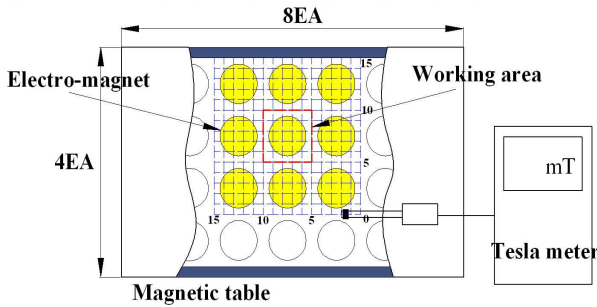


Fig. 4 Measuring method of magnetic flux density

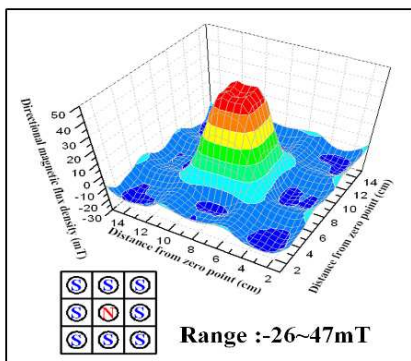


Fig. 5 Magnetic flux density of working area on electro-magnet array table

3. 실험의 구성

마그네슘 합금의 2세대 자기연마 특성 평가 및 예측 모델 개발을 위한 실험은 Table 1에 나타난 조건에 따라 진행되었다. 마그네슘 합금은 AZ31B 판재를 사용하였다. 또한 자기연마 입자로는 #3000의 GC입자, 150 μ m 크기의 철 분말 그리고 점도가 300,000cs인 실리콘을 혼합하여 사용하였다. 실리콘은 입자의 탈락을 방지해 주는 효과를 가지고 있어 비자성체의 자기연마에 효율적이다. 간극은 1.5mm로 고정하여 적용 하였다. 또한 가공 시간은 5분으로 공통되게 적용하였다.

4. 인자의 영향평가 및 공정변수 최적화

마그네슘 합금의 2세대 자기연마 특성 평가는 실험계획법에 따라 수행되었다. 선택된 각 인자는 자기연마 입자에 작용하는 자기력 특성과 회전력에 따른 자기연마 특성평가를 위하여 Table 2에 나타난 것과 같이 어레이 테이블의 전류세기, 공구의 전류세기, 공구회전수, 연마입자량으로 선정하였다. 이때 어레이 테이블에 인가되는 전류는 9개의 전자석을 구동시킬 경우 최소 0.2A에서 최대 0.8A의 전류인가가 가능하므로 이를 각 수준에 적용하였으며, 자기연마 공구에 인가되는 전류는 최대 2.5A를 기준으로 1.5와 2.0A를 선택하였다. 공구의 회전속도는 1500rpm에서의 입자 탈락 현상을 고려하여 900에서 1500 rpm으로 선택하였다. 마지막으로 공정 중 투입되는 자기연마 입자의 량을 무게로 표시하고 1.5mm간극에 적합한 2.0g을 기준으로 0.5g씩 증감 시켰다. 또한 공구에서의 자기력과 어레이 테이블에서의 자기력의 상호 크기 변화에 따라 자기연마 입자

Table 1 Experimental setup and conditions

Item	Condition
Workpiece	AZ31B(80×60×2t)
Magnetic abrasive	GC grain(#3000)+Iron powder(150 μ m)+Silicone gel(300,000cs)
Working gap	1.5mm
Working time	5min
Feed rate	4m/min
Tool diameter	20mm

Table 2 Factors and levels used in experiment

Factors	Levels		
	1	2	3
Current of table, A(A)	0.2	0.5	0.8
Current of tool, B(A)	1.5	2.0	2.5
Spindle speed, C(rpm)	900	1200	1500
Weight of abrasive, D(g)	1.5	2.0	2.5

Table 3 Experimental results and calculated S/N ratios

No.	Initial surface roughness(μm)	Improved surface roughness(μm)	Calculated S/N ratio
1	0.63	0.48	-16.478
2	0.71	0.53	-15.089
3	0.53	0.44	-21.012
4	0.64	0.44	-13.850
5	0.58	0.32	-11.701
6	0.54	0.45	-20.915
7	0.47	0.27	-14.111
8	0.61	0.46	-16.654
9	0.58	0.45	-17.924
10	0.58	0.46	-18.132
11	0.57	0.36	-13.432
12	0.58	0.42	-16.138
13	0.59	0.39	-14.155
14	0.58	0.31	-11.277
15	0.60	0.50	-20.000
16	0.57	0.41	-16.082
17	0.53	0.27	-11.701
18	0.57	0.38	-14.563
19	0.46	0.20	-11.734
20	0.52	0.27	-11.903
21	0.53	0.27	-11.701
22	0.50	0.27	-12.803
23	0.58	0.37	-13.432
24	0.53	0.33	-14.155
25	0.68	0.49	-14.471
26	0.59	0.43	-15.864
27	0.61	0.38	-12.765

들의 절삭력이 변화 할 것으로 추정되고 공구 및 어레이 테이블의 자기력과 공구 회전에 따른 회전력 변화에 따라 자기연마 효율이 결정될 수 있기에 각 인자들간의 상호 교호작용이 예상된다.

Table 4 ANOVA for each factor

	S_i	ϕ_i	V_i	F_{0i}	$F_{0.01}$
A	46.777	2	23.388	14.994	10.9
B	0.6190	2	0.309	0.198	10.9
C	44.734	2	22.367	14.339	10.9
D	1.892	2	0.946	0.606	10.9
AxB	20.931	4	5.232	3.354	9.15
AxC	52.155	4	13.038	8.359	9.15
BxC	31.360	4	7.840	5.026	9.15
Error	9.358	6	1.559		
Total	207.829	26			

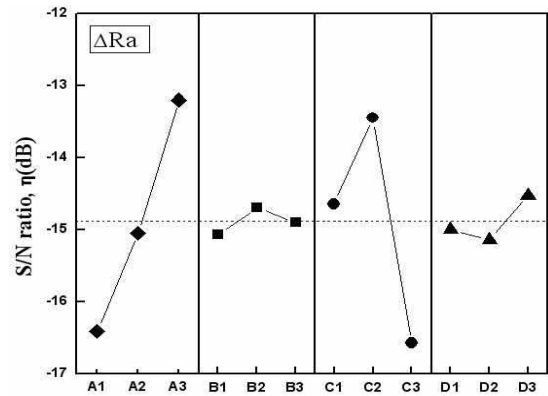


Fig. 6 Influence of polishing factors on surface roughness

실험은 $L_{27}(3^{13})$ 표준 직교배열표에 따라 수행되었으며 13개의 열에 주요인자 및 교호작용이 예상되는 인자들을 배치하였다. 실험의 결과 값은 자기연마 전과 후의 평균 표면거칠기의 값을 측정하고, 향상된 정도로 나타내었다. 또한 이 값이 증가할수록 자기연마 효율이 높다고 평가 할 수 있기 때문에 망대 특성을 이용한 신호대 잡음비(S/N ratio)로 환산하였다. Table 3은 직교배열표에 따른 실험 결과 및 신호대 잡음비를 나타낸다.

실험결과는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 어레이 테이블에 인가되는 전류와 공구의 회전수가 표면 거칠기의 향상에 높은 영향을 미치고 있음을 나타낸다. Table 4에 나타난 분산분석의 결과 또한 어레이 테이블의 전류와 공구의 회전수가 99%의 유의 수준을 만족하고 있어 표면거칠기의 향상에 가장 많은 영향을 미침을 나타낸다. 여기서 S_i 는 각 인자별 S/N비의 제곱합을, ϕ_i 는 각 인자별 자유도(Degree of freedom)를, V_i 는 제곱평균을, F_{0i} 는

제공평균비를 나타낸다.

그리고 어레이 테이블의 전류값과 공구 회전수의 교호작용과 공구의 전류값과 공구 회전수의 교호작용이 표면거칠기의 향상에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 반면 공구에 인가되는 전류와 공정 중 투입된 입자의 무게는 유의수준 이하를 보이고 있어, 표면거칠기 향상에 영향이 매우 낮은 것으로 판단된다. 이는 어레이 테이블의 자기력의 세기와 공구의 회전력이 마그네슘 합금의 자기연마의 효율에 가장 큰 영향을 미치는 반면, 공구의 자기력세기와 입자의 투입량은 상대적으로 적은 것으로 볼 수 있다.

따라서 마그네슘 합금의 자기연마에서 어레이 테이블의 자기력 세기 및 공구의 자기력 세기 그리고 공구의 회전력에 따른 표면거칠기 향상을 예측할 수 있는 모델이 필요하다. 또한 Fig. 6을 통해 0.8A의 어레이 테이블 전류와 2.0A의 공구 전류, 1200rpm의 회전수, 2.5g의 입자량 일 때 가장 높은 표면거칠기 향상을 얻을 수 있는 최적화 결과임을 확인할 수 있다.

5. 표면거칠기 예측모델 개발

5.1 S/N비를 이용한 예측모델

마그네슘합금의 자기연마 효율 예측을 위한 모델을 개발하였다. 우선 S/N비를 이용한 예측모델을 개발하였다. 인자들의 서로 다른 수준 조합에서의 각 특성치들의 S/N비(η_{sn})를 아래 식 (1)과 같이 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_{sn} &= \overline{\eta_{sn}} + (A_i - \overline{\eta_{sn}}) + (B_j - \overline{\eta_{sn}}) \\ &\quad + (C_k - \overline{\eta_{sn}}) + (D_l - \overline{\eta_{sn}}) \\ &= -3 \overline{\eta_{sn}} + (A_i + B_j + C_k + D_l) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\overline{\eta_{sn}}$ 은 각 특성치의 S/N비의 평균치이고, A_i, B_j, C_k, D_l 는 각 인자가 서로 다른 수준에서의 특성치에 대한 영향이다. 예측모델의 분산분석 결과는 Table 5와 같다.

Table 5 Analysis of the variance for S/N ratio

	S_i	\emptyset_i	V_i	F_{0i}	$F_{0.01}$
Model	0.0427	4	0.0106	4.5597	4.33
Residual	0.0515	22	0.0023		
Total	0.0942	26			

그 결과를 살펴보면 S/N비의 예측모델이 99%의 유의 수준을 만족하고 있다. 특성평가를 통해 얻어진 최적 자기연마 조건과 임의의 두 조건에서의 S/N비 예측 결과와 실험결과를 비교하여 Table 6에 나타내었다.

5.2 반응표면 모델

또 다른 예측모델은 반응표면분석기법을 이용하는 것이다. 반응표면모델의 개발에 있어서 얻고자 하는 반응표면과 관련 변수들이 선형적인 관계를 가질 경우 1차 반응표면모델로 가정하고, 반응표면과 변수들이 곡선적인 관계를 가질 때는 2차 반응표면모델을 구한다. 본 연구에서는 표면거칠기 2차 반응표면 모델을 아래 식 (2)와 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \Delta Ra &= -0.677525238 + 0.046606A + 0.2633557B \\ &\quad + 0.00113841C - 0.05471886D + 0.0606419A^2 \\ &\quad - 0.056942335B^2 - 0.000000523C^2 \\ &\quad + 0.063218003D^2 - 0.029700025AB \\ &\quad + 0.000294894AC - 0.145297703AD \\ &\quad + 0.0000123BC - 0.023207141BD \\ &\quad - 0.0000592CD \end{aligned} \quad (2)$$

실험데이터로부터 계수행렬의 계산에 필요한 과정들은 사용프로그램인 MATLAB을 이용하였다. 2차 반응표면 예측모델의 분산분석결과 Table 7과 같다. 그 결과 예측모델은 99%의 유의수준을 만족함을 보여준다.

Table 8은 최적가공조건과 임의의 두 조건에서의 반응표면 예측결과를 나타내고 있다. 최적가공조건의 제외하고 임의의 인자 조합에서 평균 약 89%의 정확도를 나타낸다.

Table 6 Verification of S/N ratio model

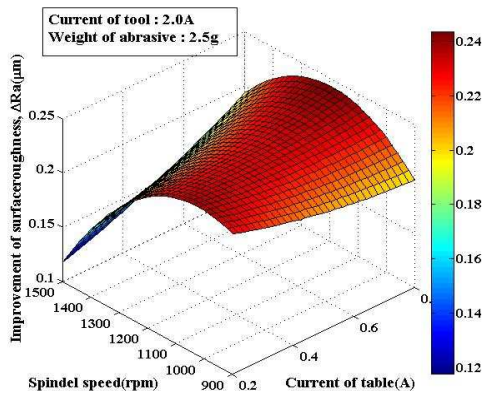
MAP condition	Measured value(μm)	Predicted value(μm)
$A_3B_2C_2D_3(OP)$	0.342	0.275
$A_2B_2C_2D_2$	0.226	0.207
$A_3B_3C_3D_3$	0.209	0.187

Table 7 Analysis of the variance for RSM

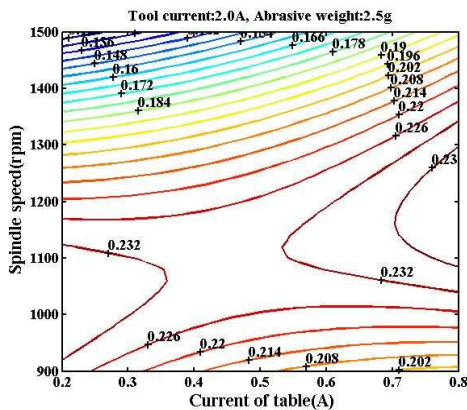
	S_i	\emptyset_i	V_i	F_{0i}	$F_{0.01}$
Model	0.0504	14	0.0036	1.5544	0.2248
Residual	0.0278	12	0.0023		
Total	0.0782	26			

Table 8 Verification of response surface model

MAP condition	Measured value(μm)	Predicted value(μm)
A ₃ B ₂ C ₂ D ₃ (OP)	0.342	0.249
A ₂ B ₂ C ₂ D ₂	0.226	0.212
A ₃ B ₃ C ₃ D ₃	0.209	0.173



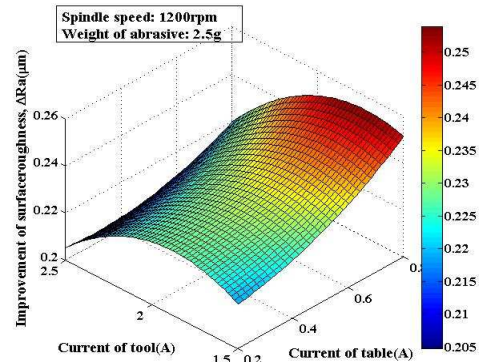
(a) 3D plot



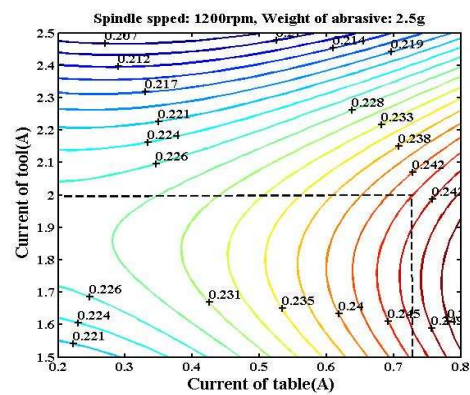
(b) Contour plot

Fig. 7 3D plot and contour plot of second-order RSM for predicting improvement of surface roughness according to the current of table and spindle speed

반응표면 예측모델로부터 얻을 수 있는 3차원 그래프를 이용하여 가공조건의 변화에 따른 특성치들의 값을 입체적으로 확인하고 이를 각 특성치들의 상관관계에 따른 결과치를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 어레이 테이블의 전류값과 공구의 회전수에 따른 또는, 어레이 테이블과 공구의 전류에 따른 표면거칠기 변화 관계를 그래프를 통해 확인하고 마그네슘의 자기연마 가공에 응용하고자 한다. Fig. 7은 어레이 테이블의 전류와 공구 회전수에 따른 3차원 반응표면모델을 나타낸다.



(a) 3D plot



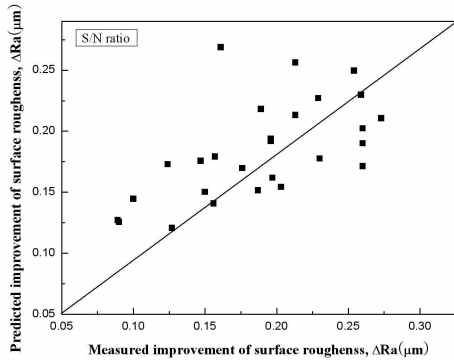
(b) Contour plot

Fig. 8 3D plot and contour plot of second-order RSM for predicting improvement of surface roughness according to the current s of table and tool

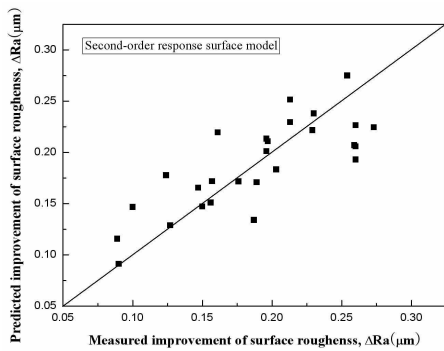
어레이 테이블의 전류가 0.3~0.6A일 때 공구의 회전수가 1000~1200rpm 범위에 있으면, 우수한 표면거칠기 향상 결과를 만들 수 있다. Fig. 8은 어레이 테이블의 전류값과 공구의 전류값 변화에 따른 표면거칠기의 향상 예측결과를 보여준다. 그 결과 전체적으로 어레이 테이블의 전류가 높고, 공구의 전류가 낮을 때 가장 우수한 표면거칠기 향상 결과를 예측할 수 있다. 또한 목표로 하는 표면거칠기 향상에 대한 어레이 테이블의 전류값을 선정할 수 있다. 예를 들어 Fig. 8(b)에서 공구의 전류값이 2A로 고정 하고, 0.245 μm 의 표면거칠기 향상을 얻고자 한다면 어레이 테이블의 전류세기는 약 0.72A가 선택되어야 한다.

예측모델의 예측정도는 결정계수 R^2 을 이용하여 평가할 수 있다. 본 연구에서의 결정계수 R^2 은 S/N비 예측모델의 경우 0.4532이고, 반응표면모델의 경우 0.6445를 나타낸다.

이는 반응표면 모델의 예측정도가 S/N비 모델



(a) S/N ratio



(b) Second-order response surface model

Fig. 9 Correlation between predicted and measured improvement of surface roughness

보다 우수함을 보여준다. Fig. 9는 각 예측 모델로 예측한 예측값과 직교배열표의 실험으로 얻은 실험값의 비교를 통해, 반응표면모델의 경우가 우수함을 보여준다.

6. 결론

본 연구에서는 마그네슘 합금의 2세대 자기연마의 특성평가 및 예측모델을 개발하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 2세대 자기연마를 이용한 마그네슘 합금의 연마공정에서 자기력 향상을 위해 설치한 어레이 테이블의 자기력 세기와 공구의 회전수가 표면거칠기의 향상에 가장 많은 영향을 미친다.

(2) 본 연구의 실험조건 범위에서 최적의 2세대 자기연마 조건은 어레이 테이블의 전류가 0.8A, 공구의 전류값이 2.0A, 공구의 회전수가 1200rpm, 연마입자의 무게가 2.5g일 때이다.

(3) S/N비 예측 모델 및 반응표면모델의 개발을 통해 어레이 테이블과 공구의 자기력 세기에 따른 표면거칠기 향상 정도를 예측 할 수 있다. 예측모델은 2차 반응표면 모델이 S/N비 예측모델보다 우수한 성능을 보인다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0015271).

참고문헌

- (1) Kim, D. M., Kim, H. S. and Park, S. I., 1996, "Magnesium for Automotive Application," *Journal of KSAE*, Vol. 18, No. 5, pp. 53~67.
- (2) Sohn, K. Y., 2003, "The Effect of Heat Treatment and Extruded Mg-Al-Zn Alloy," *Material Science Forum*, Vol. 419-422, pp. 135~140.
- (3) Hwang, J. K. and Kang, D. M., 2006, "FE Analysis on the Press Forging of AZ31 Magnesium Alloy," *Trans. of the KSAE*, Vol. 14, No. 1, pp. 81~91.
- (4) Shaohui, Y. and Takeo, S., 2004, "A Comparative Study: Polishing Characteristics and its Mechanisms of Three Vibration Modes in Vibration-assisted Magnetic Abrasive Polishing," *Int. J. Machine Tool Manufact.*, Vol. 44, No. 4, pp. 383~390.
- (5) Kwak, J. S., 2009, "Enhanced Magnetic Abrasive Polishing of Non-ferrous Metals Utilizing A Permanent Magnet," *Int. J. Machine Tool Manufact.*, Vol. 49, No. 7~8, pp. 613~618.
- (6) Kim, S. O. and Kwak, J. S., 2008, "Improvement of Magnetic Force and Experimental Verification for Magnetic Abrasive Polishing of Aluminum Alloy," *Trans. of KSMTE*, Vol. 17, No. 5, pp. 23~29.
- (7) Kim, S. O., Kwak J. S. and Kim T. H., 2010, "Characteristic on Magnetic Abrasive Polishing with Change of Curvature," *Conference of KSPE*, pp. 141~142.