

알루미늄의 자기연마가공에서 영구자석을 이용한 자기력향상

김상오⁺, 객재섭^{*}

(논문접수일 2008. 1. 8, 심사완료일 2008. 4. 14)

Improvement of Magnetic Force and Experimental Verification for Magnetic Abrasive Polishing of Aluminum Alloy

Sang-Oh Kim⁺, Jae-Seob Kwak^{*}

Abstract

Magnetic abrasive polishing is one of the nontraditional machining technologies newly developed. But it was very difficult to cut non-magnetic materials using MAP process because the process was fundamentally possible by help of a magnetic force. In this study, we aimed to verify analytically formation of the magnetic field in a case of the nonmagnetic materials especially focused on an aluminum alloy. And also an improving strategy of the magnetic force for the non-magnetic materials was proposed and experimentally verified. Design of experimental method was adopt for assessment of parameters' effect on the MAP results of the aluminum alloy.

Key Words : Magnetic abrasive polishing(자기연마), Aluminum alloy(알루미늄 합금), Design of experimental method(실험계획법), Magnetic density flux(자속밀도), Magnetic force(자기력)

1. 서론

자기연마법은 기존의 연마방법과 다르게 매우 유연성을 지닌 공구를 사용하여 연마하는 방식이다. 이때 사용되는 공구는 자성 입자와 비자성의 연마입자를 용융결합 또는 단순 혼합하여 사용된다⁽¹⁾. 자기연마입자는 전자기장의 영향으로 인해 공작물과 공구사이에 브러쉬 형태로 배열되고, 공구의 회전력에 의해 연마공정을 수행한다⁽²⁾. 가공은 공구의 회전

력과 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⁽³⁾. 그러나 알루미늄이나 스테인레스 같은 비자성체의 자기연마공정에서는 자성체보다 자기연마공정의 효율이 현저히 감소함을 발견 할 수 있었다. 따라서 이번 연구에서는 비자성체 중에서 현재 전자제품의 Body

* 부경대학교 기계공학부 (jskwak5@pknu.ac.kr)
주소: 부산 남구 용당동 산 100번지

+ 부경대학교 대학원

및 항공기·자동차의 부품으로 각광 받는 알루미늄 소재를 이용하여 자기력을 증가하기 위한 연구를 실시하였다. 이를 위해 먼저 자기장 해석프로그램을 이용하여 자기력을 증가시킬 수 있는 효율적인 방법을 제시하고, 실험계획법을 이용하여 제시된 방법에 따라 평면상의 알루미늄 합금의 자기연마특성을 평가하였다.

2. 자기연마의 이론적 배경

2.1 자기연마

자기연마법의 가공 기구를 개략적으로 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 입자나 자성입자와 연마입자를 일정 비율로 혼합한 혼합형 입자를 슬러리 형태로 공급한다. 전자석에 전류가 부가된 연마공구는 자성입자를 구속하게 된다. 연마공구와 공작물사이의 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⁾.

2.2 자기연마의 절삭력과 에너지

자속밀도는 자기장 안의 어떤 점에서 자기장에 수직인 단위면적당의 자기력선의 수를 나타낸다. 즉, 전류의 세기가 증가할수록 자속밀도는 증가하기 때문에 식 (1)의 관계가 성립한다.

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

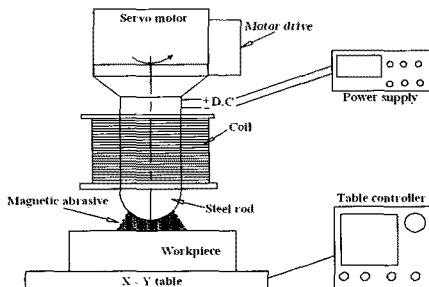


Fig. 1 Configuration of magnetic abrasive polishing

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. 이러한 자력에 의한 힘의 특성과 공구의 회전력에 의한 접선방향의 힘의 특성이 동시에 작용하여 실제적인 연마가공을 수행한다. 따라서 자기연마에서는 공구의 회전속도와 공구에 인가되는 전류의 세기에 따라 그 성능에 영향을 미치게 된다.

Fig. 2에 도시한 것과 같이 자기연마입자에 의해서 공작물에 작용하는 법선 방향의 전체 힘 f_n 과 공구의 회전에 의해 발생하는 접선 방향의 전체 힘 f_h 의 합력 f 를 받게 된다. 이때의 힘 f 에 의해 연마 가공이 이루어진다.

가공 중 실제 공작물의 표면을 연마하는 요소는 연마입자이다. 이러한 연마 입자 1개는 법선방향의 힘 P_n 과 접선방향의 힘 P_h 를 받는다. 따라서 연마 입자군이 공작물에 미치는 힘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_n = mP_n, \quad f_h = mP_h \quad (2)$$

여기서 m 은 가공 중 공작물에 접촉하는 총 연마입자의 개수를 나타낸다.

또한 여기에서 자성연마 입자군과 공작물 사이에 발생하는 전체 법선 방향의 힘 f_n 은

$$f_n = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_{fm}}\right) S \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 S 는 자성연마 입자와 공작물이 접촉하는 전체 면적을 나타낸다⁽⁵⁾.

그리고 자성연마 입자군과 공작물 사이에 발생하는 전체 접선방향의 힘 f_h 는

$$f_h = \frac{dW}{dx} \quad (4)$$

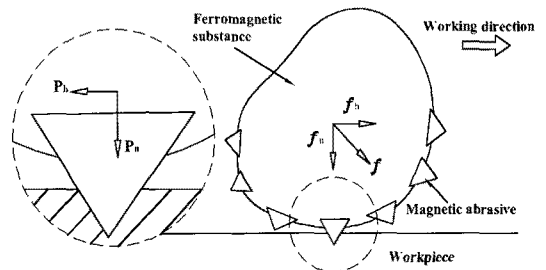


Fig. 2 Cutting force in magnetic abrasive polishing

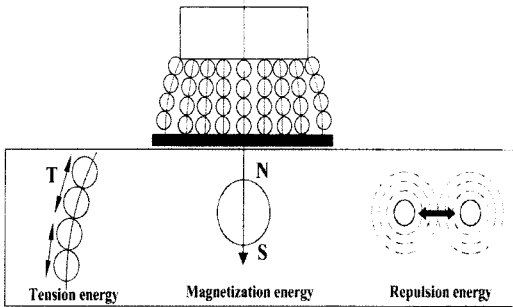


Fig. 3 magnetic abrasive brushes

로 나타낼 수 있다. 여기서 x 는 자력이 발생하는 공구의 중심에서 원주 방향의 거리를 나타낸다. 그리고 W 는 공구와 공작물 사이에 자력에 의해 정렬된 자성연마 입자에 작용하는 에너지이다. 즉, 공구의 중심에서의 거리변화에 따른 에너지의 변화량이 접선방향의 힘이다. 자성연마 입자에 작용하는 에너지 W 는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 3가지 에너지로 구성되어 있다. 첫째는 자성연마 입자가 자력에 의해 정렬될 때 그때 발생하는 자력에 의한 에너지 W_m 이다. 둘째는 자화된 자성연마 입자들 사이에는 패러데이 법칙에 의해 자화되었기에 척력이 발생하게 되어 서로 밀어내어 발생하는 반발에너지 W_f 이다. 마지막 셋째는 자기연마입자가 밀집된 상태에서 공구가 회전하면 공구의 끝단 부위에서 발생하는 인장 에너지 W_i 이다. 따라서 전체 W 는 다음과 같이 나타낸다.

$$W = W_m + W_f + W_i \quad (5)$$

만약 정렬된 브러쉬가 안정된 상태에 있을 경우는 W 가 일정하게 유지되는 상태일 것이며 $dW = 0$ 이 된다. 가공 중 공작물과 공구 사이에 포함된 자성연마 입자의 량이 적을 경우에는 자력에 의한 영향력이 반발력이나 인장력 보다 강하게 작용할 것이다. 즉,

$$W_m > \max.[W_f, W_i] \quad (6)$$

의 관계가 성립한다.

하지만 공급되는 연마입자의 량이 증가할수록 자력에너지는 반발에너지와 인장에너지보다 작게 작용 할 것이다.

$$W_f > W_m, W_i > W_m \quad (7)$$

Fig. 4는 자기연마 가공의 메커니즘의 계략도를 나타낸 것이다. 여기서 보여주는 입자는 혼합된 형태의 자기연마입자

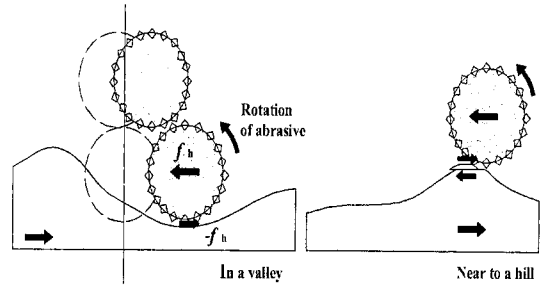


Fig. 4 Mechanism of magnetic abrasive polishing

이다. 자기연마입자는 접선방향의 힘 f_h 에 의해서 연마가 진행 된다. 만약 f_h 가 충분히 크지 못할 경우, 자기연마입자가 입자보다 넓은 계곡 사이에 위치하게 되면 연마입자가 계곡에 부딪히면서 모멘트가 발생하게 된다. 이렇게 발생한 모멘트에 의해 공작물을 제거하지 못하고 계곡을 타고 회전하며 올라가게 될 가능성이 높다. 반면 자기연마입자가 언덕 위에 위치하여 가공할 경우는 자기연마입자에 작용하는 접선방향의 힘 f_h 에 의해 언덕의 끝단을 가공할 수 있어 자기연마 가공에 의해 공작물의 표면이 평탄화 될 수 있음을 보여준다⁶⁾.

3. 자기력 향상을 위한 시뮬레이션

3.1 전류의 세기에 따른 자력변화

본 연구에서는 UG NX3를 이용하여 자기연마 장치의 인덕터를 모델링하고 ANSYS Workbench 10.0에서 제공하는 EMAG Solution을 이용하여 자기연마 공구부분에 대한 시뮬레이션 작업을 진행하였다.

자기연마 공정에 적용되고 있는 인덕터는 공급되는 전류의 세기에 따라 자기력이 증감한다. 따라서 첫 번째 비교 모델은 전류세기의 변화에 따른 자력증감 효과를 시뮬레이션 하였다. 이때 Table 1과 같은 해석 조건을 부여하였다. Fig. 5는 인덕터와 알루미늄 합금의 모델링된 형상과 meshing 작

Table 1 Analysis conditions for intensity of current

Items	Conditions
Node	299009
Element	174011
Mesh size	0.005mm
Current	1.5 , 2A

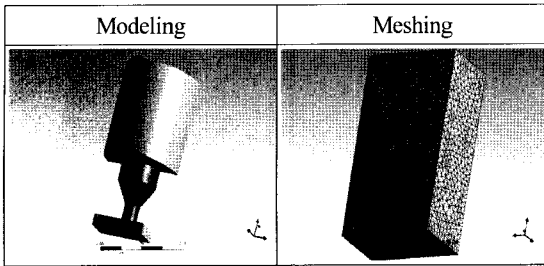


Fig. 5 Modeling and mesh condition(normal condition)

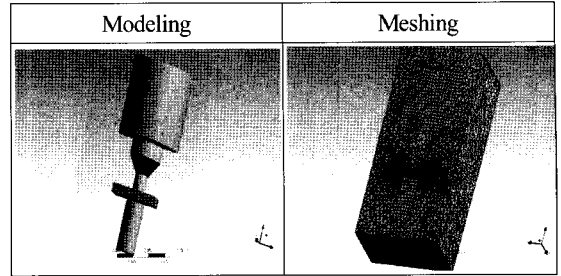


Fig. 7 Modeling and mesh condition(permanent magnet)

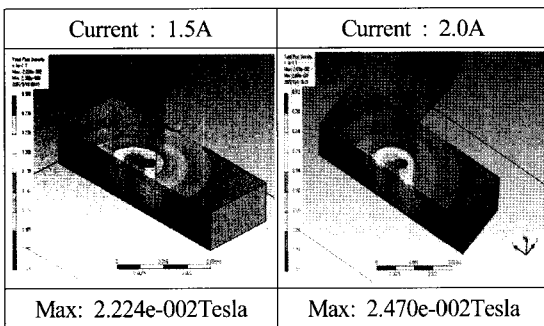


Fig. 6 Magnetic density flux according to change of current

업후의 모델이다. Fig. 6은 전류의 세기변화에 따른 자속밀도 크기를 나타낸 해석결과이다. 전류의 세기를 1.5A에서 2A로 증가 시켰을 때 알루미늄 합금의 표면과 인덕터 사이에 발생한 자속밀도의 세기는 최고 2.224e-002T에서 2.470e-002T로 상승하였다.

앞 장의 식 (1)과 같이 전류의 세기에 따라 자속밀도가 변화하였으며, 자속밀도의 세기가 가장 높은 위치에서 가장 큰 자기력이 발생하여 자기연마의 성능이 증가할 것으로 예측할 수 있다.

3.2 영구자석을 이용한 자력향상

Fig. 7은 알루미늄 합금의 표면에 형성되는 자속밀도를 좀 더 효율적으로 증가시키기 위하여 알루미늄 합금의 반대편에 영구자석을 추가로 설치하여 모델링한 화면이다. 이때 적용된 조건은 Table 2에 나타내었다. Fig. 8에 해석 결과를 나타내었다.

자속밀도는 동일한 전류(1.5A)를 부가하였을 때 영구자석의 설치 전의 최대 2.224e-002T에서 설치 후 최대 3.004e-002T로 상승하였다. 이 값은 전류값을 2A로 상승시켰을 때 보다 20%이상 향상된 결과를 보여준다. 또한 인덕터의 중심거리

Table 2 Analysis conditions with magnet

Items	Conditions
Node	309400
Element	180444
Mesh size	0.005mm
Current	1.5 , 2A

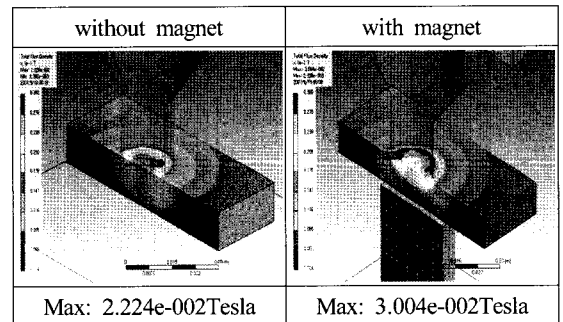


Fig. 8 Magnetic density flux compared with two situations

에서 중앙에 해당하는 부위에서 가장 큰 자속밀도의 증가를 보여주고 있다. 이러한 증가의 결과는 단순히 시스템에서 전류만을 증가시키는 것보다, 자기력증가를 위한 강자성체를 사용했을 때 더욱 더 효율적으로 자기력을 향상시킬 수 있음을 나타낸다. 이러한 결과를 바탕으로 비자성체의 효율적인 자기연마를 위한 자기력향상 시스템을 개발할 수 있다.

3.3 검증실험 및 결과

위와 같은 결과를 실제적으로 검증하기 위하여 동일조건에서 영구자석을 알루미늄합금 반대편에 설치하였을 경우와 설치하지 않았을 경우에 대해 표면거칠기의 향상정도를 비교하였다.

이는 자기연마의 특성상 표면거칠기의 향상이 가공효율

과 비례적 관계에 있기 때문이다. 자기연마의 메커니즘에 따라 자기연마 입자는 공작물의 표면형상의 끝단부위를 자기력과 회전력에 의해 제거하며 평탄화 작업을 하기 때문이 그 이유이다. 이러한 과정에서 가공치수나 금속제거량의 변화가 너무 미세하여 성능평가의 척도로 사용하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 표면거칠기의 향상정도를 자기연마의 효율성의 기준으로 간주 하였다.

Table 3에 실험조건을 나타내고 있다. 실험결과는 Fig. 9에 나타나는 것과 같이 영구자석을 설치하였을 경우 20회 이상의 가공 후에 표면거칠기가 영구자석을 설치하지 않은 경우 보다 급격히 향상됨을 보여준다.

이와 같은 결과는 2장에서 자기연마의 이론적 메커니즘과 비교하여 설명할 수 있다. 이론적으로 자기연마 입자에 작용하는 힘의 종류는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 전자석에 의해 생성된 자기력이며 두 번째는 공구의 회전에 의해 생성된 접선력이다. 결국 자기연마 시스템에서의 절삭력은 이 두 가지 분력의 합으로 나타낼 수 있다. 여기서 비자성체

의 경우 자성체와 달리 소재 자체의 자속밀도 및 투자율이 낮다. 따라서 식 (3)에 의해 자기력이 현저히 낮아져서 결국에는 절삭력의 저하로 이어진다. 이를 극복하고자 임의적으로 영구자석을 이용하여 절삭력을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

4. 알루미늄 자기연마의 특성평가

4.1 실험계획법

본 연구에서는 자기연마 공정에서 각각의 인자가 표면거칠기에 미치는 영향력을 평가하기 위하여 최소의 실험으로 결과에 인자가 미치는 영향을 효과적으로 평가할 수 있는 실험계획법을 이용하였다.

Table 4는 본 실험에서 각 실험마다 공통적으로 적용된 실험조건을 나타내었다. Table 5는 실험계획법에 따라 적용된 인자 및 인자들의 수준을 나타내고 있다. 여기서 인덱터의 회전수는 선행 연구에서 1000rpm 이상의 회전에서는 크기가 150 μ m 이상의 입자들이 급속히 공구로부터 이탈함을 알았기에 1000rpm을 기준으로 500rpm씩 증감하였다. 전류의 세기 또한 1.5A를 기준으로 0.5A씩 증감하였다. 실험에 적용된 자기연마입자의 구성을 나타내었다. Table 7은 본 실험

Table 3 Experimental conditions for verification

Items	Conditions
Magnetic flux density	0.2Tesla
Traverse speed	0.2m/min
Magnetic abrasive	Al ₂ O ₃ +Fe(bonded type)
Grain size	150~200 μ m
Revolution speed	1000rpm
Workpiece	Aluminum alloy(Al6061)
Current	1.5A
Working gap	1~1.5mm

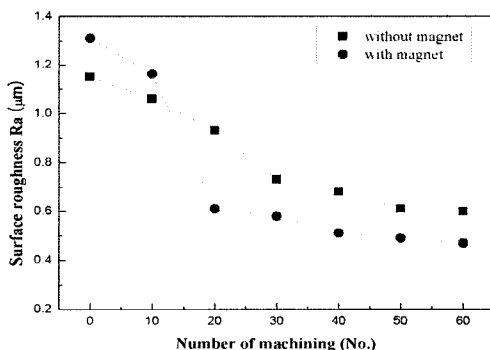


Fig. 9 Experimental result compared with two situations

Table 4 Experimental conditions

Items	Conditions
Traverse speed	0.2m/min
The number of machining	20th
Workpiece	Aluminum alloy(Al6061)
Workpiece size	35*25*12mm
Coolant	Continuance

Table 5 Factors and levels used in experiment

Sign	Factors	unit	Level		
			1	2	3
A	Revolution speed	rpm	500	1000	1500
B	Abrasive type	-	a	b	c
C	Working gap	mm	1	1.5	2
D	Current	A	1	1.5	2

Table 6 Magnetic abrasive type

Type	Condition
a	Fe+SiC powder(100 μ m)
b	Fe+Al ₂ O ₃ (100 μ m)
c	Fe+Diamond paste(3 μ m)

Table 7 Orthogonal array table for L₉(3⁴)

No.	Factor			
	A	B	C	D
1	500	a	1.0	1.0
2	500	b	1.5	1.5
3	500	c	2.0	2.0
4	1000	a	1.5	2.0
5	1000	b	2.0	1.0
6	1000	c	1.0	1.5
7	1500	a	2.0	1.5
8	1500	b	1.0	2.0
9	1500	c	1.5	1.0

에 사용된 L₉(3⁴) 표준직교배열표를 나타낸 것이다. 표에 따라 실험의 실시회수는 9회로 하였다.

4.2 실험 및 결과

직교배열표에 따라 9번의 실험을 실시하고 표면거칠기의 향상정도를 측정하였으며, 이 결과를 다시 S/N비로 변환하였다. 여기서 S/N비는 표면거칠기의 향상정도는 그 값이 증가하면 할수록 좋은 값이므로 망대특성치를 이용하여 계산하였다. 그 결과를 Table 8에 나타내었다. 결과를 보면 실험 9번이 가장 좋은 결과를 가지고 있다. 계산된 S/N비를 이용하여 각 인자가 결과에 미치는 영향력정도를 확인하기 위해 각 인자에 대한 S/N비로 환산하여 그래프로 표시하였다. 그 결과는 Fig. 10과 같다. 여기서 A인자인 인덕터의 회전수가 결과에 가장 큰 영향력을 미치고 있는 반면 D인자인 전류의 세기가 가장 작은 영향력을 미치고 있음을 보여준다. 또한 이번 실험에서 표면거칠기를 향상시킬 수 있는 최적의 가공 조건은 A3B2C2D1일때이다. 즉, 인덕터의 회전수가 1500rpm, 자기연마입자가 b type, 가공 간극이 1.5mm, 전류의 세기가 1A일 때 가장 최적의 조건이 된다. 이를 토대로 분석하면 연구자석을 설치할 경우 표면거칠기의 향상은 전류의 세기

Table 8 Experimental results and S/N ratios

No.	Result	
	Improvement of surface roughness(Δ Ra)	S/N ratio(dB)
1	0.22	-13.1515
2	0.316	-10.0063
3	0.214	-13.3917
4	0.364	-8.7779
5	0.396	-8.0461
6	0.286	-10.8727
7	0.416	-7.6181
8	0.472	-6.5211
9	0.486	-6.2672

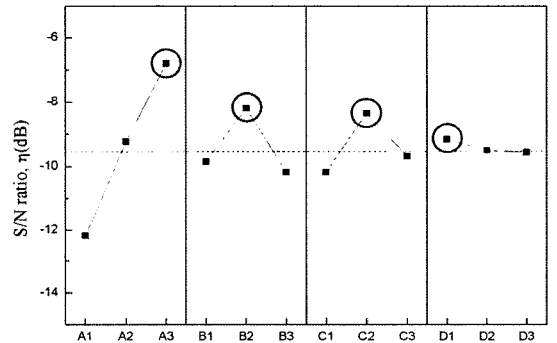


Fig. 10 Influence of factors on the surface roughness (Ra)

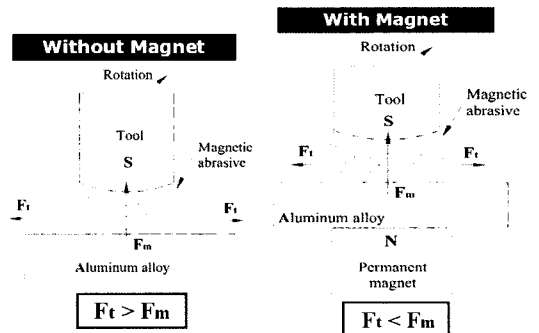


Fig. 11 Mechanism of MAP for aluminum alloy

와는 거의 무관하며 인덕터의 회전수가 증가할수록 좋은 결과를 얻을 수 있음을 나타낸다. Fig. 11은 위의 실험결과를

토대로 제시할 수 있는 알루미늄 합금 표면의 자기연마 메커니즘을 나타내고 있다. 알루미늄 표면의 자기연마에 영구자석과 같은 자기력향상을 하지 않았을 경우에 자기력에 의한 법선방향의 힘이 인덕터의 회전에 의한 접선방향의 힘보다 작아져서 가공능력이 저하한다. 반면 영구자석을 설치하였을 경우에는 법선방향의 힘이 접선방향의 힘보다 크게 발생하기 때문에 접선방향의 힘이 증가 할수록 가공 능력이 증가한다.

5. 결론

본 연구에서는 알루미늄의 자기연마에서 알루미늄표면에 발생하는 자기력을 향상시키기 위한 방법을 제안하고 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션하고, 이를 실험을 통하여 검증하였다. 또한 자기연마에서 각 인자들이 미치는 영향력을 실험계획법을 이용하여 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 알루미늄의 자기연마에서 전류의 세기를 증가 시킬 때 보다 영구자석을 이용하여 자력을 증가 시켰을 때 알루미늄 표면에서의 자속밀도 향상이 약 20%이상 높았다.
- (2) 실험계획법을 이용한 자기연마의 특성평가에서 인덕터의 회전수가 증가 할수록 표면거칠기가 더욱더 향상되었다. 이는 영구자석에 의한 자기력 증가로 법선방향의 힘이 회전력에 의한 접선방향의 힘보다 세기 때문에 접선방향의 힘이 증가 할수록 가공성능이 우수함을 보여준다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업(과제명: Pre-polymer) 중합설비 설계 및 시스템 최적화기술 개발, 과제번호: 20070130134117)으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

- (1) Chang, G. W., Yan, B. H. and Hsu, R. T., 2002, "Study of Cylindrical Magnetic Abrasive Finishing using Unbonded Magnetic Abrasives," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 42, No. 5, pp. 575~583.
- (2) Singh, D. K. and Jain, V. K., 2005, "Analysis of Surface Texture Generated by a Flexible Magnetic Abrasive Brush," *WEAR*, Vol. 259, No. 7-12, pp. 1254~1261.
- (3) Shaohui, Y. and Takeo, S., 2004, "A Comparative Study: Polishing Characteristics and its Mechanisms of Three Vibration Modes in Vibration-assisted Magnetic Abrasive Polishing," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 4, pp. 383~390.
- (4) Ko, S. L., Baron, Yu M., and Park, J. I., 2007, "Micro Deburring for Precision Parts Using Magnetic Abrasive Finishing Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187~188, pp. 19~25.
- (5) Shimura, T. and Aizawa T., 1988, "Development of Plane Magnetic Abrasive Finishing Apparatus and its Finishing Performance (2nd Report, Finishing Apparatus Using a Stationary Type Electro-magnet)," *Journal of Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 54, No. 5, pp. 928~933.
- (6) Mori, T., Hirota, K., and Kawashima, Y., 2003, "Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143~144, pp. 82~686.