한국생산제조시스템학회지 Vol.20 No.2 2011. 4. pp. 174~179
Korean Society of Manufacturing Technology Engineers

휴리스틱 알고리즘을 이용한 평면 자기연마 공구경로 최적화

김상오+, 유만희++, 곽재섭*

(논문접수일 2010. 11. 24, 심사완료일 2011. 1. 5)

Tool-Path Optimization of Magnetic Abrasive Polishing Using Heuristic Algorithm

Sang-Oh Kim+, Man-Hee You++, Jae-Seob Kwak*

Abstract

This paper focuses on the optimal step-over value for magnetic tool path. Since magnetic flux density is changed according to distance from center of magnetic tool. Enhanced surface roughness is also different according to change of radius. Therefore, to get a identical surface roughness on workpiece, it is necessary to find optimal tool path including step-over. In this study, response surface models for surface roughness according to change of radiuses were developed, and then optimal enhanced surface roughness for each radius was selected using genetic algorithm and simulated annealing to investigate relation between radius and surface roughness. As a result, it found that step-over value of 6.6mm is suitable for MAP of magnesium alloy.

Key Words : Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), Simulated Annealing(모의 담금질), Magnetic Abrasive Polishing(자기연마)

1. 서 론

자기연마법은 기존의 연마방법과 다르게 매우 유연성을 지닌 공구를 사용하여 연마하는 방식이다. 자기연마입자는 전자기장의 영향으로 인해 공작물과 공구사이에 브러쉬 형태로 배열되고, 공구의 회전력에 의해 연마공정을 수행한다[1]. 가공은 공구의 회전력과 코일에 인가되는 전류에 의해 생성되는 자기력으로 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[2]. 그러나 알루미늄이나 스테인레스 같은 비자성체의 자기연마공정에서는 자성체보다 자기연마 공정의 효율이 현저히 감소한다. 따라서 비자성체의 자기연마에서는 자기력 향상을 위해 영구자석을 이용하는 방안이 연구되었으며, 그 효과를 검증하였다[3]. 또한 자기연마 공구에 발생하는 자속밀도의 세기 및 회전력은 공구의 중심 거리에 따라 변화한다. 이러한 변화는 평면의 자기연마 공정에서 공구 중심간 거리에 따른 표면거칠기의 편차를 심화시킨다. 따라서 본 연구에서는 공구 중심간 거리에 따른 표면거칠기의 반응표면 모델을 개발하고 이를 유전자 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링을 이용하여 최적화된 값을 기준으로 중심간 거리와 표면거칠기의 향상정도에 대한 관계식을 완성하였다. 완성된 관계식을 통해 공구경로상의 공구간격을 최적화 시킬 수 있었다.

* 부경대학교 기계공학과 (jskwak5@pknu.ac.kr)
주소: 부산 남구 용당동 산100번지
+ 부경대 대학원 생산자동화전공
++ 대한상공회의소 부산인력개발원

2. 자기연마

2.1 자기연마의 원리

자기연마법의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 인덕터에는 코일이 감겨 있으며 그 코일에 전류를 부가하면, 패러데이 법칙(Faraday's law)에 의해 자기력이 발생하는 연마 공구가 된다. 공작물의 끝단과 공작물 사이에 간극을 주고 그 공간에 자성체와 연마입자를 용융하여 분쇄한 일체형 입자 또는 자성입자와 연마입자를 일정비율로 혼합한 혼합형 입자를 슬러리 형태로 공급한다. 전자석에 전류가 부가된 연마공구는 자력선 방향으로 자성입자를 구속하게 되며 구속된 자성입자는 사슬구조(Chain-like structure)로 정렬되며 연마입자는 자성입자들 사이에 위치하게 된다. 이처럼 사슬구조로 형성된 입자들은 유연성을 가지는 브러쉬 역할을 수행하게 된다[4-6].

2.2 자기연마에서 힘과 표면거칠기의 상관관계

자기연마법에서 실제적인 연마가공을 수행하는 힘은 인덕터에서 발생한 자기장에 의해 생성된 자속밀도에 의한 힘과 공구의 회전력에 의한 접선방향의 힘의 특성이 동시에 작용하여 연마가공이 수행된다.

Fig. 1에서와 같이 자기 연마입자는 법선 방향의 전체 힘 F_n과 공구의 회전에 의해 발생하는 접선방향의 전체 힘 F_h의 합력 F_t이 작용하여 연마가공이 이루어진다. 식 (1)은 가공물의 표면을 Fig. 2와 같이 가정하고 n번 가공 시의 평균표면거칠기를 나타낸다[7].

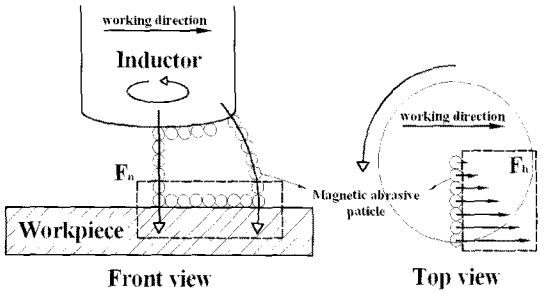

Fig. 1 Schematic of magnetic abrasive polishing

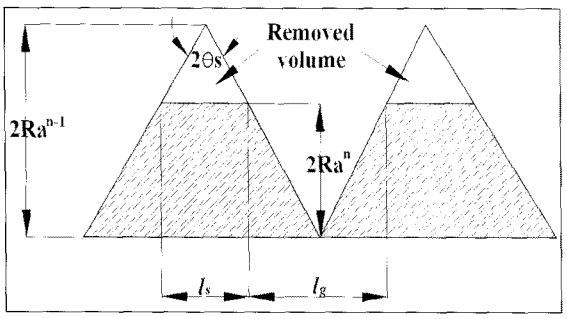

Fig. 2 Shape of scratch machined

$$R_a^n = R_a^{n-1} - \frac{1}{l_w} R_a^{n-(1/2)} \sqrt{\frac{\Delta f_t N}{H_{mt} \pi \tan\theta} \sum_{i=1}^{2n} (1 - \frac{R_a^n}{R_a^0}) l_w} \quad (1)$$

여기서 R_a^n는 n번 가공후의 표면 거칠기이고, l_w는 가공물의 총길이, H_{mt}는 가공물의 경도를 나타내며, N은 가공 되어지는 자성입자의 수를 나타낸다. Δf_t는 하나의 연마입자가 가공물에 미치는 힘으로

$$\Delta f = \frac{f}{n} = \frac{D^2 \pi}{4n} (\mu_0 \frac{H_a^2}{4} \frac{3\pi(\mu_M - 1)\omega}{3(2+\mu M) + \pi(\mu M - 1)\omega}) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 n은 가공에 참여하는 연마입자의 총 개수, D는 연마입자의 직경, μ_M은 자기연마에서의 상대투자율, ω는 연마입자의 체적비를 나타내며, H_a는 공기 중에서의 자속의 힘을 나타낸다.

3. 휴리스틱 알고리즘

제한된 정보와 시간제약을 고려한 최적화 문제를 해결하기 위해서 빠른 시간에 근사최적해를 찾을 수 있는 발견적(Heuristic)기법에 관한 연구가 이루어지고 있으며, 발견적 기법의 연구는 해결하고자 하는 문제마다 각기 특성에 맞추어 개발해야 하는 어려움이 있다. 특정 문제가 갖는 정보에 구속되지 않고 다양한 문제에 적용가능한 상위수준의 발견적 기법인 메타 휴리스틱이 사용되며 그 종류로는 유전자 알고리즘, 시뮬레이티드 어닐링, 개미군 최적화 등이 있다[8].

3.1 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)

유전자 알고리즘은 생물학 원리에 바탕을 둔 최적화 기법중의 하나이다. 유전자 알고리즘은 생명체의 유전 및 진화 과정을 전산학적으로 모델링한 기계학습 방법이다. 기존의 최적화 알고리즘은 최적화 하고자 하는 목적 함수를 미분화해서 탐색을 수행하는 반면, 유전자 알고리즘은 선택 연산자, 교배 연산자, 돌연변이 연산자와 적합도를 이용해서 탐색을 수행한다. 또한 점에 의한 탐색이 아니라 개체들이 모여 이루는 군집에 의한 병렬적인 탐색이라는 점에서 기존의 최적화 알고리즘과 다르다. 한 세대의 개체들은 진화를 거듭하며 이전 세대에 축적된 정보를 서로 교환하고 새로운 영역으로 탐색을 시도한다. 이러한 탐색은 방향이나 영역이 초기값에 의해서 결정되지 않고 세대마다 확률적으로 결정되므로 지역 최소점에 빠질 가능성이 적어 전역 최적화가 가능한 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 크게 5단계의 절차에 의해 수행되며, 첫 번째로 초기 유

전자 집단을 생성한다. 적용할 목적함수와 유전자로 이용할 변수를 결정하고, 유전자와 군집의 크기를 결정한다. 두 번째로는 적합도 계산이다. 생성된 초기 군집에 대하여 시스템의 목적함수에 따르는 적합도를 계산한다. 세 번째는 재생산 과정이다. 적합도를 바탕으로 하여 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 연산자를 이용하여, 개체의 생존 분포를 결정하고 2개의 개체 사이에 염색체를 바꾸어 넣어 새로운 개체를 발생시킨다. 그리고 유전자의 어떤 부분의 값을 강제로 바꾸고, 유전자 집단으로서의 다양성, 즉 돌연변이 연산을 수행하게 된다. 네 번째로는 적합도 계산이다. 새롭게 생성된 유전자 집단에 대해 각 개체의 적합도를 계산한다. 유전자 알고리즘의 마지막 과정은 평가이다. 계산된 적합도를 기준으로 만족하는 개체의 유무를 평가하며, 만족한 결과를 보이는 개체가 존재하면 알고리즘을 종료하고, 그렇지 않으면 재생산 단계로 돌아가 위의 과정을 반복하게 된다.

3.2 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)

시뮬레이티드 어닐링은 커다란 탐색공간에서 주어진 함수의 전역 최적점에 대한 근사치를 찾으려고 하는 전역최적화 문제에 대한 일반적인 확률적 휴리스틱 접근 방식이다. 시뮬레이티드 어닐링의 명칭과 정신은 야금학의 담금질(annealing)에서 따온 것이다. 즉 결정체의 크기를 크게하고 결함을 작게 하려고 금속에 열을 가하고 냉각시키는 속도를 조절하는 기술에서 따온 것이다. 조합적 최적화문제를 해결하기 위해서 흔히 반복적 개선법이 사용되었다. 반복적 개선법은 현재의 해의 근방의 모든 해들이 현재의 해의 비용함수보다 큰 값을 가져 더 이상 새로운 해로의 이동이 불가능할 때 종료하게 되는데, 이때 얻어지는 해는 국부 최소해라고 볼 수 있다. 대부분의 경우 반복적 개선법은 해집합 전체 중에서 얻어진 전체 최소해가 아닌 국부 최소해를 주고 종료하게 된다. 시뮬레이티드 어닐링의 원리는 반복적 개선법을 기본으로 하되 비용증가의 이동을 확률적으로 허용하고 있어 국부 최소해에 빠져버리는 단점을 개선한 최적화 기법이다.

4. 메타 휴리스틱 알고리즘을 이용한 경로 최적화

4.1 공구반경에 따른 표면거칠기 최적화

자기연마 공정에서 자기연마 공구의 중심거리에 따라 자속밀도 및 회전력이 변화한다. 이러한 변화는 자기연마 공정 후 공구의 중심거리에 따른 표면거칠기의 편차를 발생시킨다. 표면거칠기의 편차의 정도를 예측하고 이를 최적화하기 위하여 실험계획법을 이용한 2차 반응표면모델을 각 중심거리에 따라 개발하였다. Fig. 3은 공구 중심거리에 따른 자속밀도 변화와 중심거리에 따른 연마입자들의 트랙을 보여준다. 본 연구에서는 중심을 포함한 특정 4개의 지점(r=0, 3.3, 6.6, 10.0mm)을 선정하고 이에 따른 2차 반응표면모델을 선정하였다. 실험은 $L_{27}(3^4)$의 직교배열표에 따라 각 지점에 대한 표면거칠기를 평가하였다. Table 1은 실험에 적용된 조건을 보여준다. 소재는 AZ31B 마그네슘 합금 판재를 사용하였고, 비자성체의 자기연마 효율향상을 위해 실리콘 겔과 GC 입자를 혼합한 자기연마 입자를 활용하였다. 또한 전자기력 어레이 테이블을 공작물 반대편에 설치하여 자기력을 향상시켰다. 공구 직경은 20mm이며, 가공시간은 5분으로 설정하였다.

Table 2는 실험에 적용된 각 인자 및 수준을 나타내고 있다. 공정 인자는 전자기력 어레이 테이블의 전류세기(A), 공구의 전류세기(B), 공구의 회전수(C) 그리고 자기연마 입자량(D)이다. 각 수준은 선행 연구결과를 통해 얻어진 최적의 조건들을 기준으로 3수준으로 나누었다. Table 3은 각 공구 반경 지점에 대한 실험결과를 나타낸다. 실험의 결과 Table 4의 분산분석 결과와 같이 자기력 테이블에 발생하는 자기력의 세기와 공구

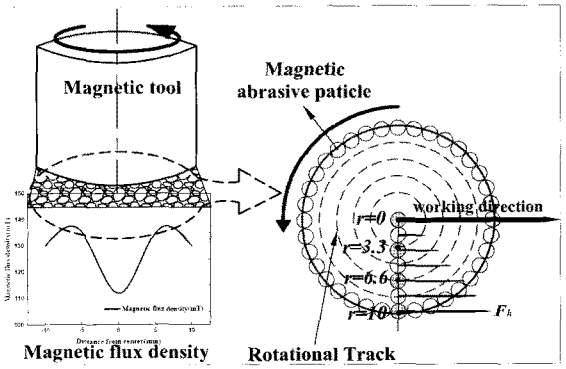

Fig. 3 Rotational track and magnetic flux density

Table 1 Experimental conditions

Items	Conditions
Workpiece	AZ31B(80×60×2t)
Magnetic abrasive	GC grain(#3000)+Iron powder(150㎛)+Silicone gel(300,000cs)
Working gap	1.5mm
Working time	5min
Tool diameter	20mm

Table 2 Factors and levels used in experiments

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 for each track

No	r=0	r=3.3	r=6.6	r=10.0
1	0.3886	0.2686	0.3636	0.2736
2	0.4286	0.3136	0.3086	0.3836
3	0.6114	0.4714	0.4414	0.4814
4	0.4757	0.4157	0.2757	0.3707
5	0.4057	0.3507	0.2657	0.2807
6	0.6529	0.3929	0.4129	0.5629
7	0.4214	0.3214	0.3214	0.4664
8	0.4314	0.4664	0.3614	0.4514
9	0.5143	0.4243	0.4493	0.4343
10	0.5486	0.4836	0.3586	0.4486
11	0.5472	0.3772	0.2222	0.3922
12	0.5914	0.5064	0.2314	0.4314
13	0.4243	0.4643	0.2793	0.3693
14	0.3972	0.2822	0.2322	0.3422
15	0.5872	0.4522	0.4172	0.4972
16	0.5214	0.4164	0.3964	0.3864
17	0.4714	0.3564	0.2564	0.2514
18	0.5657	0.4207	0.2657	0.3857
19	0.4729	0.2979	0.3279	0.2429
20	0.3914	0.3264	0.2814	0.3164
21	0.3829	0.3229	0.2729	0.3129
22	0.5343	0.3893	0.2543	0.2993
23	0.4929	0.4029	0.2579	0.3579
24	0.4743	0.4543	0.2593	0.4043
25	0.5343	0.4243	0.3093	0.3493
26	0.5143	0.4743	0.3393	0.3743
27	0.5272	0.3322	0.2322	0.3772

의 회전수가 표면거칠기의 향상에 민감한 영향을 미치고 있음을 보여준다.

이러한 결과는 공구의 반경에 따른 자속밀도 및 회전력의 변화가 중심간 거리에 따른 표면거칠기의 편차에 큰 영향을 미칠 것임을 보여준다. 실험결과를 이용하여 각 지점에 대한 2차 반응표면 모델을 적합도 함수로 결정하고, 유전자 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링을 이용하여 최적화 하였다. 우선 유전자 알고리즘의 경우 한 집단의 개체수는 20으로 하고 룰렛 휠방식을 사용하여 최적화 하였다. 이때 교배율과 돌연변이률은 각각 0.8, 0.05로 설정하였다. 그 결과는 Table 5와 같다. 각 중심거리에 따른 각 변수들의 최적 값은 모든 지점에서 유사한 값을 보인다. 반면 최적의 표면거칠기는 중심에서 가장 높고 r=6.6지점에서 가장 낮게 나타난다. 이러한 결과값은 Table 6과 같이 급속 어닐링 방법을 이용한 시뮬레이티드 어닐링 에서도 동일한 결과를 보인다. Fig. 4～7은 각 기법의 최적해 탐색과정을 보여준다.

Table 4 ANOVA for each factor

	SS	DOF	V	F_0	$F_{0.01}$
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			

Table 5 Optimal values using GA

Parameter	*r=0*	*r=3.3*	*r=6.6*	*r=10*
A	0.792	0.799	0.799	0.798
B	1.515	1.5	1.91	1.5
C	1232.8	1127	1340	1004.3
D	1.5	1.5	1.5	1.501
Ra(Op)	0.39	0.354	0.181	0.239

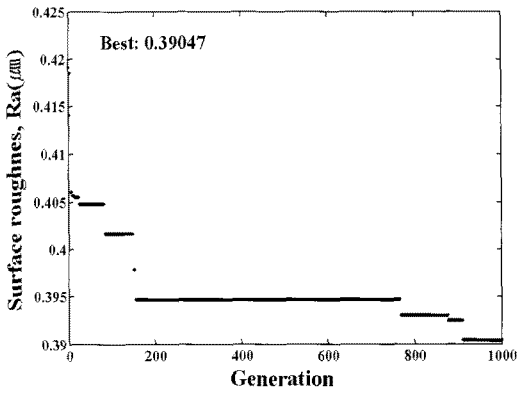

Fig. 4 Convergence of best individual for surface roughness to generation during optimization process GA at r=0mm

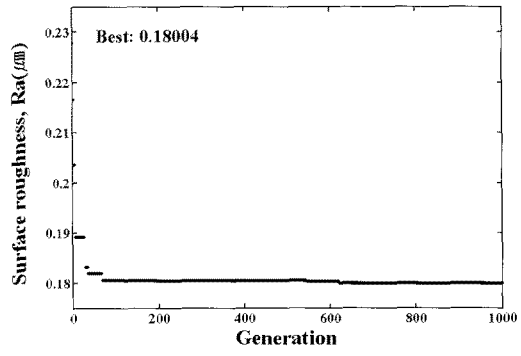

Fig. 5 Convergence of best individual for surface roughness to generation during optimization process GA at r=6.6mm

Table 6 Optimal values using SA

Parameter	*r=0*	*r=3.3*	*r=6.6*	*r=10*
A	0.201	0.8	0.798	0.749
B	2.49	1.5	1.823	1.927
C	1040	1120.1	1354.6	1129.7
D	2.489	1.5	1.5	1.517
Ra(Op)	0.389	0.354	0.180	0.211

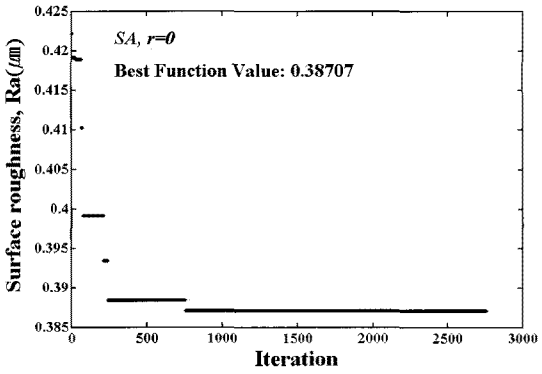

Fig. 6 Convergence of best individual for surface roughness to generation during optimization process SA at r=0mm

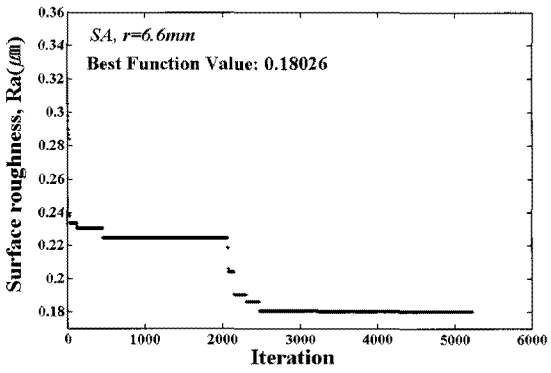

Fig. 7 Convergence of best individual for surface roughness to generation during optimization process SA at r=6.6mm

4.2 공구경로 간격 선정

각 회전반경에 대해 동일한 공정변수가 적용 되더라도 표면거칠기의 향상이 달라짐을 휴리스틱 알고리즘을 이용한 최적화를 통해 확인 할 수 있었다. 따라서 Fig. 8과 같은 평면 자기연마 공정의 공구경로에서 적절한 공구 간 간격을 선정하는 것이 중요하다. 중첩되는 작업영역에서 반경에 따른 표면거칠기의 편차를 줄이기 위해서 이다. 공구 간 간격 선정을 위하여 최적화 과정을 통해 얻어진 각 반경에 따른 향상된 표면거칠기 관계식을 계산하여 적용하였다. 각 점에 대한 95% 신뢰구간을 적용하더라도 중심에서 1.16mm 지점이 가장 낮은 표면거

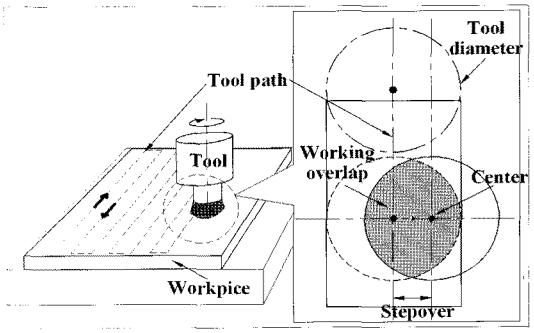

Fig. 8 Tool path of magnetic abrasive polishing

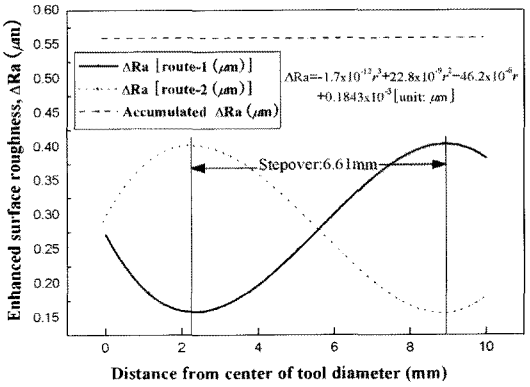

Fig. 9 Determination of step-over value on MAP

칠기 향상을 나타내는 반면 중심에서 7.78mm 지점에서 가장 높은 표면거칠기 향상을 보인다. 따라서 가장 높은 표면거칠기 향상을 가지는 지점과 가장 낮은 향상을 가지는 지점간의 거리(약 6.6mm)를 공구경로 상의 공구 간격으로 설정하면 평면의 자기연마 공간에서 표면거칠기의 편차를 줄일 수 있다. 이러한 방법은 Fig. 9에 나타난 것과 같이 복잡한 공구경로의 설정이 없어도 단순한 중첩 경로를 통해 보다 평탄화된 표면거칠기를 얻을 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 공구의 반경에 따른 표면거칠기의 편차를 줄이기 위한 최적의 공구 간 간격을 선정하기 위하여 2차 반응표면모델 개발과 유전자 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링 기법을 활용한 최적화 과정을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차 반응표면 모델 개발을 위한 실험 결과 자기력 테이블의 자기력 세기와 회전속도가 표면거칠기의 향상에 영향이 크다. 따라서 공구 반경에 대한 표면거칠기의 편차 또한 크다.

(2) 유전자 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링을 이용한 각 반경에 대한 반응표면모델 최적화 결과, 동일한 공정 조건에

서도 중심에서 가장 높은 표면거칠기를 가지고, 반경 6.6 mm에서 가장 낮은 표면거칠기를 가진다.

(3) 공구 반경에 따른 표면거칠기의 향상정도를 3차 함수로 정리하고 가장 효율이 높은 반경지점(r=7.7mm)과 가장 효율이 낮은 반경 지점(r=1.1mm)의 간격을 평면 자기연마에서 공구 간 간격으로 설정할 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

(1) 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 of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 4, pp. 383~390.

(2) Kwak, J. S., 2009, "Enhanced Magnetic Abrasive Polishing of Non-Ferrous Metals Utilizing a Permanent Magnet," *International of Machine Tools & Manufacture.*, Vol. 49, No. 7~8, pp. 613~618.

(3) 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.

(4) Kim, S. O., You, M. H., and Kwak, J. S., 2008, "Performance Evaluation of Magnetic Abrasive Polishing by Design of Experiments," *Trans. of KSMTE*, Vol. 17, No. 4, pp. 35~41.

(5) 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 of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 383~390.

(6) Park, W. G., Roh, T. W., Seo, Y. I., Choi, H., Lee, J. C., Jung, S. H., and Chae, S., 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.

(7) Wani, A. M., Yadava V., and Khatri, A., 2007, "Simulation for the Prediction of Surface Roughness in Magnetic Abrasive Flow Finishing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, pp. 282~290.

(8) Balas, E., and Martin, C., 1979, "Pivot and Complement-A Heuristic for 0-1 Programming", *Management Science,* Vol. 26, pp. 86~96.