Grey relational analysis를 이용한 비자성체의 자기연마 최적화
Optimization of MAP for Non-magnetic Material using Grey Relational Analysis

*김상오[1], 하경호[2], 박영환[3], 강대민[3], #곽재섭[3]
*S. O. Kim[1], K. H. Ha[2], Y. H. Park[3], D. M. Kang[3], #J. S. Kwak(jskwak5@pknu.ac.kr)[3]
[1] 부경대학교 대학원, [2](주)에스앤에프, [3]부경대학교 기계공학부

Key words : Grey Relational Analysis, Optimization, Magnetic Abrasive Polishing

1. 서론

자기연마법은 기존의 연마방법과 다르게 매우 유연성을 지닌 공구를 사용하여 연마하는 방식이다. 이때 사용되는 공구는 자성입자와 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 회전력과 코일에 인가되는 전류에 의해 생성되는 자기력에 의해 진행되기 때문에 자기력의 세기는 자기연마의 성능과 매우 밀접한 관계를 가진다. 선행연구를 통하여 전류의 공급량이 클수록 표면거칠기 및 MMR(금속제거율)이 개선된다는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 스테인레스와 같은 비자성체의 자기연마공정에서는 자성체보다 자기연마 공정의 효율이 현저히 감소함을 발견 할 수 있었다. 따라서 이번 연구에서는 자기연마 비자성체의 자기연마 공정변수를 최적화하고 이들 변수간의 관계를 알아보기 위하여 실험계획법을 통해 실험을 수행하고, 이 결과를 바탕으로 Grey Relational 분석을 수행하여 그 결과를 분석하였다.

2. Grey Relational Analysis

Grey system 이론에서는 존재하는 시스템을 White, Black, Grey system의 3가지로 분류하고 있으며, Grey system은 시스템의 정보가 불명확한 시스템을 의미한다. Grey relational analysis는 1982년 Deg(3)에 의해 처음으로 소개되었던 Grey system 이론에서 파생된 것으로 목표치에 근거한 실험 결과의 경향을 예측하기 위한 개로운 분석법이다. 이 분석법은 통계상의 두 개 이상의 연속물에 대한 수치상의 상관관계를 파악하는 것이다. 측정된 결과(original sequence)에 대한 경향을 정량화시키기 위해 0과 1사이의 값(decimal sequence)을 갖는 Coefficient로 계산하고, Grade를 결정하여 최적 공정조건을 획득할 수 있는 효과적인 분석법이다. Grey analysis에서의 Grade값의 처리를 위해 몇 가지 Data의 전처리 과정을 거친다. 공정 목표값이 망대특성, 망소특성, 망목특성인 경우 각각 아래의 전처리 과정을 거친다.

$$x_i^*(k)=\frac{x_i^{(0)}(k)-\min.x_i^{(0)}(k)}{\max.x_i^{(0)}(k)-\min.x_i^{(0)}(k)} \quad (1)$$

$$x_i^*(k)=\frac{\max.x_i^{(0)}(k)-x_i^{(0)}(k)}{\max.x_i^{(0)}(k)-\min.x_i^{(0)}(k)} \quad (2)$$

$$x_i^*(k)=1-\frac{\left|x_i^{(0)}(k)-x^0\right|}{\max.\left\{\max.x_i^{(0)}(k)-x^0;x^0-\min.x_i^{(0)}(k)\right\}} \quad (3)$$

여기서 $x_i^{(0)}(k)$는 측정된 고유값(original sequence)이고, x^0는 목표치를 의미한다. 전처리 과정을 통해 변환된 변환값($x_i^*(k)$)과 가중 함수를 고려하여 상관 계수(coefficient)와 Grey Relational Grade를 아래의 식을 통해 구할 수 있다.

$$\gamma(x_0^*(k),x_i^*(k))=\frac{\Delta_{\min.}+\xi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k)+\xi\Delta_{\max}}$$

$$0<\gamma(x_0^*(k),x_i^*(k))\le 1 \quad (4)$$

$$\gamma(x_0^*,x_i^*)=\sum_{k=1}^{n}\beta_k\gamma(x_0^*(k),x_i^*(k))$$

$$\sum_{k=1}^{n}\beta_k=1 \quad (5)$$

식(4)는 Coefficient를 식(5)는 Grade를 나타낸다. 여기서 $\Delta_{0i}(k)$는 변환 목표값($x_0^*(k)$)과 변환값($x_i^*(k)$)의 편차를 나타내고, $\Delta_{\max}$와 $\Delta_{\min}$은 각각 그 편차의 최대값과 최소값을 의미한다. 그리고 ξ는 분배 계수(distinguishing coefficient)를 나타내며 Minimum Information 법칙에 따라 통상 0.5로 적용된다(4-5).

3. 비자성체의 자기연마 실험

실험은 직교배열표를 구성하여 진행하였다. 실험에서 다루어야 할 많은 설계인자들을 큰 그물과 같은 형태로 만들어 주된 효과와 기술적으로 예상되는 인자들 간의 상호작용은 고려하고 그 이외의 상호작용들을 희생시켜, 실험회수를 적게 할 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표이다. 따라서 직교배열표를 이용하면 최소의 실험으로 실험결과에 관여하는 인자가 미치는 영향을 효과적으로 평가할 수 있게 된다. 직교배열표에서 모든 열은 서로 직교하기 때문에 임의의 두열을 골라서 그 곱의 합을 구하면 영(Zero)이 되는 성질을 갖고 있다. 직교배열표의 이러한 성질때문에 기존의 방법들과는 달리 여러 가지 인자를 동시에 조절할 수 있으며, 각 인자들은 항상 직교하기 때문에 독립적으로 평가가 가능하게 해준다. 또한 직교배열표에서는 각 인자별 및 조건별 동일한 회수의 실험이 이루어지도록 하는 성질이 있다.(6)

Table 1은 본 실험에서 선택한 인자와 그 수준을 나타내었다. 최적조건의 인자를 찾기 위한 실험을 바탕으로 하여 인자들의 수준을 선택하였으며, 자기연마장치의 사용되는 인덕터의 전기용량을 고려하여 전류의 세기를 1.5, 2.0, 2.5A로 선정하였으며, 공구의 회전속도는 서보모터의 용량이 0~60Hz로 약 0~3700rpm까지 가능하다. 그러나 1500rpm 이상에서는 연마입자들의 이탈이 많이 발생하므로 가공이 어렵다. 이러한 점을 고려하여 회전속도를 1500rpm 이하로인 900, 1200, 1500rpm으로 선정하였다. 공작물과 공구 사이의 간격은 최적조건 실험데이터를 바탕으로 각각 1.0, 1.5, 2.0mm로 선정하였다. 또한, 비자성체의 자기력 향상을 위해 Fig.1과 같이 영구자석을 설치하고 자기력의 세기는 각각의 영구자석의 숫자의 따라 가우스메터(Gauss-meter)를 이용하여 측정한 뒤 52mT(3개), 79mT(5개), 82mT(7개)의 조건을 선정하여 실험을 실시하였다.

Table 2는 본 실험에 사용된 $L_9(3^4)$ 표준직교배열표를 나타낸 것이다. 직교배열표에는 4개의 열에 주요인자 및 상호작용이 예상되는 인자들을 배치하였고, 실험의 실시회수는 9회로 하였다. 직교배열표에서 숫자 1, 2와 3은 각 인자들의 수준을 의미한다.

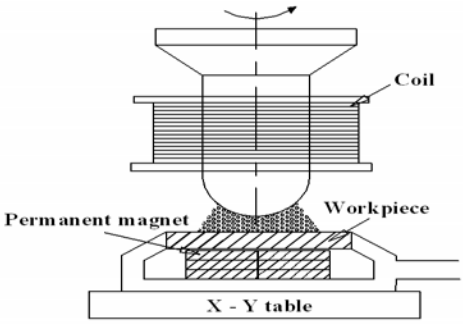

Fig. 1 Schematic of experimental method

Table 1 Factors and levels used in experiment

Factors	Level		
	1	2	3
Rotational speed, A(rpm)	900	1200	1500
Magnetic flux density (permanent magnetic), B(mT)	52	79	82
Current, C(A)	1.5	2.0	2.5
Working gap, D(mm)	1.0	1.5	2.0

Table 2 Orthogonal array table for $L_9(3^4)$

No.	Factors			
	A	B	C	D
1	900	52	1.5	1.0
2	900	79	2.0	1.5
3	900	82	2.5	2.0
4	1200	52	2.0	2.0
5	1200	79	2.5	1.0
6	1200	82	1.5	1.5
7	1500	52	2.5	1.5
8	1500	79	1.5	2.0
9	1500	82	2.0	1.0

4. 실험의 결과 및 분석

Table 2의 직교배열표에 따라 진행된 실험결과는 자기연마 공정 전과 후의 표면거칠기(Ra)값의 차이로 나타내었다. 즉 표면거칠기의 향상이 클수록 비자성체의 자기연마 성능이 우수하다고 판단할 수 있다. Table 3은 식(1)과 식(4)에 의해 계산된 값을 보여주고 있다. 망대특성에 의한 전처리 값과 Coefficient값이 클수록 최적화에 가까운 공정변수라고 볼 수 있다. Table 4는 각 변수의 레벨에 따른 Coefficient값을 나타내고 있다. 이를 통해 최적의 공정변수의 조합을 예측할 수 있다.

Table 3 Experimental results and calculated values

No.	Before	After	Difference	Preprocessing	Coefficient
1	0.41	0.34	0.06	0.6	0.556
2	0.33	0.28	0.05	0.4	0.455
3	0.34	0.27	0.07	0.8	0.714
4	0.38	0.32	0.06	0.6	0.556
5	0.33	0.30	0.03	0	0.333
6	0.42	0.37	0.07	0.8	0.714
7	0.45	0.37	0.08	1	1
8	0.41	0.36	0.05	0.4	0.456
9	0.45	0.39	0.06	0.6	0.556

Table 4 Coefficient for each factor and level

Factors	Level		
	1	2	3
A	1.724	1.603	2.010
B	2.111	1.242	1.984
C	1.724	1.566	2.047
D	1.444	2.169	1.724

Table 5 ANOVA for each factor

	SS	DOF	V	F0	Contribution(%)
A	0.029	2	0.015	0.015	9.8
B	0.146	2	0.073	0.073	48.0
C	0.040	2	0.020	0.020	13.3
D	0.089	2	0.044	0.044	28.9
E	0	0			
Total	0.304	8	0.152	0.152	100

Table 4를 통해 표면거칠기의 향상에 가장 최적의 변수조합은 공구의 회전수가 1500rpm, 영구자석의 세기가 52mT, 전류의 세기가 2.5A, 간극이 1.5mm일 때이다. 이는 전류의 세기와 영구자석의 세기 간에 상반된 영향력이 적용되는 것을 의미한다. 또한 Table 5의 분산분석을 통해 각 변수들이 표면거칠기의 향상에 미치는 영향정도를 분석하여 영구자석의 세기가 표면거칠기의 향상에 가장 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

비자성체의 자기연마에서 자기력 향상을 위하여 영구자석을 이용하였으며, 그러한 방법을 적용한 비자성체의 자기연마 최적화를 위해 Grey Relational Analysis를 활용하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 표면거칠기의 향상이 최적인 경우는 공구의 회전수가 1500rpm, 영구자석의 세기가 52mT, 전류의 세기가 2.5A, 간극이 1.5mm일 때 이다.
2. 영구자석의 세기가 표면거칠기의 향상에 가장 많은 영향을 미친다.

후기

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

참고문헌

1. Chang, G. W., Yan, B. H. and Hsu, R. T., "Study of Cylindrical Magnetic Abrasive Finishing using Unbonded Magnetic Abrasives," International Journal of Machine Tool & Manufacture, 42, 575-583, 2002.
2. Singh, D. K. and Jain, V. K.,"Analysis of Surface Texture Generated by a Flexible Magnetic Abrasive Brush," WEAR, 259, 1254-126, 2005.
3. Deng, J. L., "Introduction to Grey System Theory," The Journal of Grey System, 1, 1-24, 1989.
4. Tzeng, C. J., Lin, Y. H., Yang, Y. K. and Jeng, M. C., "Optimization of Turing Operations with Multiple Performance Characteristics Using the Taguchi Method and Grey Relational Analysis," Journal of Materials Processing Technology, 209, 2753-2759, 2009.
5. Deng. J. L., "Elements on Grey Theory," Wuhan:Huazhong University Science and Technology Press, 2002.