

마이크로 홀의 EDM 가공 시 생산성 향상을 위한 가공공정의 최적화

권원태⁺, 김영추^{*}

(Manuscript received: Apr, 25, 2012 / Revised: May, 16, 2012 / Accepted: May, 17, 2012)

Process Optimization for Productivity Improvement during EDM machining of a micro-hole

Won Tae Kwon⁺, Yeong Chu Kim^{*}

Abstract

Micro electrical discharge machining (μ EDM) has been used for non-conventional material removal. One drawback of μ EDM is low productivity. In this study, we tried to find the optimal machining conditions to manufacture the micro hole with an optimal machining time without loss of accuracy. Taguchi method was used to figure out the relation between machining parameters and characteristics of the process. It was found that the electrode wear, the entrance and exit clearance gave a significant effect on the diameter of the micro hole when the diameter of the electrode was identical. Grey relational analysis was used to determine the optimal machining condition for minimum machining time without loss of accuracy. The obtained optimal machining condition was the input voltage of 80V, the capacitance of 680pF, the resistance of 500 Ω , the feed rate of 1.5 μ m/s and the spindle speed of 2900rpm. The machining time was reduced to 48% without loss of accuracy under the optimal machining condition.

Key Words : EDM (Electrical discharge machining, 방전가공), Taguchi method(다구치 방법), Grey relational analysis(그레이 관계 분석), Productivity(생산성)

1. 서론

방전가공(electro discharge machining)은 요즈음 가장 많이 사용되는 특수가공 방법 중의 하나이다. 방전가공은 전도성의 공작물을 열에너지를 이용하여 가공하므로 공작물의 강도나 경도에 무관하여 자동차, 항공기 등에 사용되는 특수 합금의 가공에 이용된다. EDM 가공은 또한 전극과 공작물이 직접 접촉하지 않으므로, 가공 중 채터나 가공 후의 표면 응력 등이

발생하지 않는다⁽¹⁾. 이를 이용하여 마쓰가와는 마이크로 핀, 마이크로 노즐, 마이크로 파이프 등을 제작하였으며⁽²⁻⁵⁾, 알렌은 잉크젯 노즐을 제작하였다⁽⁶⁾. 자한은 마이크로 EDM 공정에 영향을 크게 미치는 공정 파라미터에 대하여 연구하였다⁽⁷⁾. 여러 산업분야에서 이용되는 다구치 방법이 EDM에서도 사용되어, 와이어 EDM⁽⁸⁾이나 하이브리드 시스템⁽⁹⁾의 최적 파라미터를 결정하였다. 하지만 다구치 방법은 1개의 품질 특성만 최적화 시키는 제한이 있다. 이를 극복하기 위하여 Grey 상관관계

⁺ 서울시립대학교 기계정보공학과 (kwon@uos.ac.kr)

주소: 130-743 서울시 동대문구 전농동 서울시립대학교 기계정보공학과

^{*} 두산 인프라 코어

분석을 사용하여, EDM 공정의 여러 개의 품질특성을 만족시키는 연구도 수행되었다⁽¹⁰⁻¹²⁾. Lin은 공작물계거울, 표면조도, 공구 마모율의 3가지 특성을 최적화 하였고⁽¹¹⁾, Singh는 공작물계거울, 공구마모율, 표면조도, 테이퍼 정도, 반경방향 오버컷 등을 최적화하였다⁽¹²⁾. 또한 마이크로 EDM 가공 중, 최소반경과 최고 세장비를 위한 최적화도 수행되었다^(13,14).

이 연구에서는 마이크로 EDM 가공 중, 정밀도는 그대로 유지하면서 생산성을 최대 높이는 방법이 제안되었다. 다구치 방법으로 각 파라미터가 공정에 미치는 영향을 밝혔고, 또한 그레이 상관관계분석(Grey relational analysis)으로 정밀도를 유지하면서도 생산성을 높이는 공정 파라미터를 결정하였다.

2. 실험 장치 및 실험

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 마이크로 EDM 가공기는 Fig. 1에 보여진 바와 같이 자체제작품으로 3개의 DC 모터(Dover, Trilogy LM-210)와 제어기(CM233AX)가 해상도 0.1 $\mu\text{m}/\text{count}$ 인 엔코더(Heudebhain LIP401A)와 함께 X, Y, Z축에 각각 설치되었다. 스피ن들에는 정압 공기베어링으로 지지되는 스마트 모터(Antimatics Inc. 2315D DC brushless type)를 설치하여 축방향변위 0.055 μm 이하, 회전속도 최고 3,000rpm의 성능을 구현하였다. 가공 중 칩배출은 회전력을 이용하였고 방전 회로는 입력 전압과 축전용량으로 단발 방전 에너지를 쉽게 조절할 수 있는 RC 방전 회로를 선택했으며⁽¹⁵⁾, 전극에 -전원을 연결하고, 시편에 +전원을 연결하는 정극성 가공이 가공율도 높고, 전극 소모도 작게 나타남으로⁽¹⁶⁾ 모든 실험은 정극성으로 실험하였다. 와이어 방전 가공(WEDM)에서 와이어 이송을 위해 SPG사의 S6106GB-V12 유도 모터를 이용하여, 40mm/min의 일정한 속도로 전극을 이동하였다. 직경 40mm의 와이어 송출부에는 Ogura clutch사의 hysteresis clutch break PHT-1이 장착

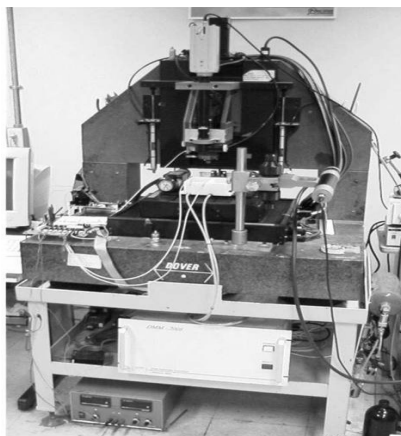


Fig. 1 Micro electric discharge machining system

되어 와이어에 3.5N의 일정한 장력이 걸리게 되어 주행편차를 최소화하였다.

2.2 전극 가공

전극은 WEDM방법으로 가공하였다. 와이어를 일정한 장력을 유지하면서, 일정 속도로 이동시켜 새로운 와이어가 계속 공급되므로 와이어 마모로 인한 가공 전극 지름의 편차를 최소화하였다. 직경 200 μm 의 황동와이어를 사용하였고, 전극은 길이 50mm, 지름 500 μm 의 WC 전극을 큰 단발 방전 에너지(>18 μJ)를 이용하여 황삭 가공한 다음, 작은 단발 방전 에너지(<4 μJ)를 이용하여 정삭 가공하였다. 등유를 절연액으로 사용하면, 전극의 길이방향 마모가 탈이온수를 사용했을 때의 2배가 된다. 그래서 전극의 길이 방향 마모를 고려하여 1200 μm 이상 길이의 전극을 가공하였다. 범용 EDM 가공에서는 전극 제작 오차가 크게 문제가 되지 않으나 마이크로 방전 가공에서는 가공 단위가 수 μm 이므로 정확한 가공 전극이 중요하다. 그래서 Matlab을 이용한 영상 처리를 이용하여 측정하였다. 영상에서 전극의 윤곽을 추출한 뒤, 그 윤곽을 전극 길이 방향에 수직인 방향으로 측정하여 전극의 지름을 구하였다⁽¹³⁾.

2.3 미세 가공 구멍

이 연구에서 가공한 WC 전극을 이용하여 SS304시편에 미세 구멍을 가공하였다. 처음 전극이 Z축 방향으로 아래로 이동하다가 전극의 끝점과 시편 사이에 단락이 발생하면, 이 위치를 Z축 원점으로 설정하여, 미세 구멍 가공이 시작하였다. 그리고 가공 중 전극의 Z축은 전극과 시편 사이의 전압을 측정하여 단락 여부를 확인한 다음 전진과 후진을 반복하며 가공하였다. 가공 후 전극의 끝점을 다시 시편에 단락시켜 Z축 원점과의 마모된 전극의 끝점의 상대적인 거리를 측정하여 전극의 길이방향 마모를 측정하였다. 평균 직경이 70~80 μm 이상인 구멍은 탈이온수를 이용하는 편이 가공 시간 및 전극 마모량에서 좋은 결과를 보여주나, 그 이하의 직경을 가지는 구멍을 가공 할 때에는 탈이온수를 사용해 가공하기 어렵기 때문에 절연액으로 등유를 사용하였다⁽¹⁾.

3. 실험 및 결과

다구치 실험계획법에 따라 실험하고, 각 파라미터가 공정에 미치는 영향을 분석한 후 그레이 상관관계 분석을 이용하여 생산성을 향상시키는 조건을 구하였다.

3.1 실험 조건

본 실험에 사용된 WC 전극은 직경 22~25 μm , 길이 1200, 1700, 2200 μm 이며, 시편은 두께 300 μm 의 SS304이다. 실험

은 입력 전압을 50, 60, 80V 세 가지 경우를 사용하였고, 축전 용량을 300, 500, 680pF으로, 충전부 저항을 500Ω으로, 이송 속도를 1.5μm/s으로, 스피들 회전속도를 1,500, 2,200, 2,900 RPM으로 세 가지 경우를 사용하였으며, 가공조건은 Table 1

에 나타내었다. 저항과 이송속도는 큰영향을 미치지 않는 것으로 밝혀져 각각 500Ω, 1.5μm/s로 고정하였다⁽¹³⁾. 각각의 실험 조건을 디구치 실험계획법 L9(3⁴) 직교배열에 적용하여 실험을 수행한 후, 결과를 Table 2에 보였다.

Table 1 Machining condition

Electrode	Material	WC
	Diameter (μm)	22~25
	Length (μm)	1,200, 1,700, 2,200
Workpiece	Material	SS 304
	Thickness (μm)	300
Dielectric fluid	Kerosene	
Experimental condition	Voltage (V)	50, 60, 80
	Capacitance (pF)	300, 500, 680
	Resistance (Ω)	500
	Feed rate (μm/s)	1.5
	RPM	1,500, 2,200, 2,900

Table 2 Experimental log and results

No.	Experimental log				Results			
	Length of electrode (μm)	Capacitance (pF)	Voltage (V)	Tool rotational speed (rpm)	Electrode Wear (μm)	No. of shorts	Machining time (sec)	Entrance clearance (μm)
1	1,200	680	50	1,500	482.74	250	1,400	7.39
2	1,200	500	60	2,200	411.05	205	1,260	9.18
3	1,200	300	80	2,900	614.87	38	1,080	9.56
4	1,700	680	60	2,900	526.87	85	1,080	8.04
5	1,700	500	80	1,500	620.96	222	1,500	9.35
6	1,700	300	50	2,200	771.01	600	2,580	9.11
7	2,200	680	80	2,200	609.03	209	1,500	12.41
8	2,200	500	50	2,900	827.77	649	2,760	10.95
9	2,200	300	60	1,500	802.92	1602	4,920	12.37

Table 3 Experimental log and results

		Electrode wear (μm)	Number of shorts	Machining time (sec)	Entrance clearance (μm)
Length of electrode (μm)	1,200	512.89	164.33	1,260	8.71
	1,700	639.61	302.33	1,720	8.83
	2,200	746.57	820	3,060	11.91
Capacitance (pF)	300	729.60	746.67	2,860	10.35
	500	629.93	358.67	1,840	9.83
	680	539.55	181.33	1,340	9.28
Voltage (V)	50	693.84	499.67	2,260	9.15
	60	590.28	630.67	2,420	9.86
	80	614.95	156.33	1,360	10.44
Tool rotational speed (rpm)	1,500	635.54	691.33	2,620	9.70
	2,200	607.03	338	1,780	10.23
	2,900	656.50	257.33	1,640	9.52

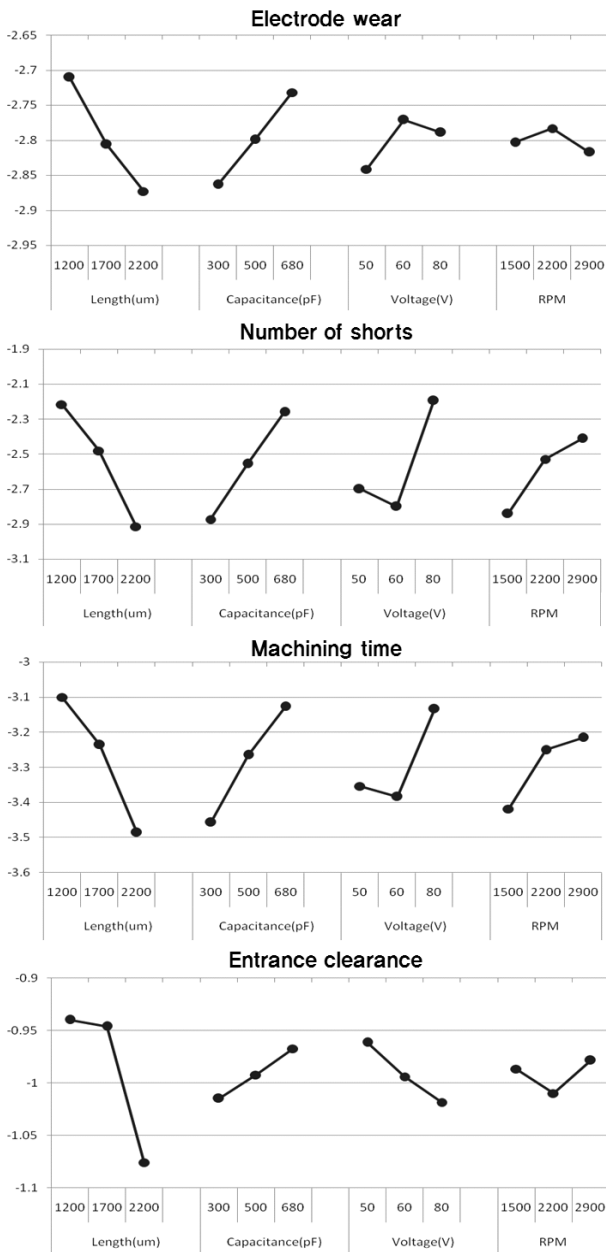


Fig. 2 Plots of factor effect

대한 결과 값은 Table 2에, 각 인자의 효과는 Table 3에, 결과 값에 $-10\log_{10}$ 을 취한 그림은 Fig. 2에 나타내었다.

3.1.1 전극 길이의 효과 분석

Table 2에서 보면 전극 길이가 1,200, 1,700, 2,200 μm 로 증가할수록 전극의 마모가 512, 639, 746 μm 로 증가함을 볼 수 있다. 이는 전극 길이가 길어질수록 단면적이 작은 부분이 길어져서 저항이 커지므로, 단발방전에너지가 작아져서 단락수와 가공시간이 늘어났기 때문이다. 늘어난 가공시간 때문에 2차방전 회수도 증가하므로 입구간극도 커졌다. 결과적으로 생산성

을 높이려면 전극의 길이는 가능한 한 짧아야 한다. 하지만 너무 짧으면 공작물의 관통할 수 없으므로 300 μm 의 공작물과 전극의 마모량을 고려할 때 1,200 μm 의 길이가 적당하다.

3.1.2 축전 용량의 효과 분석

Table 3에서 축전 용량이 300, 500, 680pF으로 증가할수록 전극의 마모량, 단락수, 가공시간, 입구간극이 작아졌다. 이는 축전용량이 클수록 단발방전 에너지가 커져서 한번에 가공하는 가공량이 증가하여 단락수와 가공시간이 감소하는 것이다. 가공시간의 단축으로 2차방전의 회수가 감소하므로 입구간극도 줄었다. 본 연구실에서 행한 다른 연구⁽¹³⁾와 병행하여 해석하면 전극마모와 입구간극은 680pF일 때, 가공시간과 단락 수는 1,300pF일 때 최소임을 알 수 있다.

3.1.3 전압의 효과 분석

다른 파라미터와는 달리 전압의 효과는 복잡하다. 전압 60V 일 때 전극마모는 최소값 590 μm , 80V 일때 단락 수와가공시간이 최소값 156번과 1,369초, 그리고 50V일 때 입구간극이 최소값 9.15 μm 를 갖는다. 결과적으로, 어떤 공정 파라미터를 최소화하느냐에 따라 전압의 선택이 달라진다. 즉, 전극마모를 최소화하려면 60V 전압, 가공시간을 최소화하려면 80V를, 그리고 입구간극을 최소화하려면 50V를 선택하면 된다.

3.1.4 회전속도의 효과 분석

회전속도가 2,200rpm일 때 전극마모가 607.03 μm 로, 1,500, 2,900rpm일 때의 전극마모 635.54, 656.50 μm 로 보다 작다. 또한 단락 수, 가공시간, 입구간극은 회전수가 2,900rpm 일때 각각 257개, 1,640sec., 9.52 μm 로 가장 작은 수치를 보였다. 결과적으로 전극마모를 최소화하려면 회전속도를 2,200rpm로, 단락수, 가공시간, 입구간극을 최소화하려면 회전속도를 2,900rpm으로 결정해야 한다.

3.1.5 효과 분석 종합

결과적으로 전극의 길이가 1,200 μm , 축전용량이 680pF일 때 마모량, 단락수, 가공시간, 입구간극이 모두 최소화 됨을 알 수 있다. 하지만 전압과 회전수는 어떤 효과를 최소화하느냐에 따라 선택이 달라진다. 예로서 단락수와 가공시간을 최소화하기 위해서 80V를 선택하면 입구간극이 커지게 된다. 이것은 다구치 방법에 내제하고 있는 문제점이다. 즉, 1개의 파라미터를 선택하여 최적화할 수 있지만 최적화해야하는 파라미터가 여러 개일 경우에는 다른 방법이 필요하다. 이를 위하여 여러 개의 파라미터를 동시에 최적화 할 수 있는 그레이 상관관계 분석법(Grey relational analysis)이 사용되었다.

3.2 미세구멍 가공 최적조건의 선정

3.2.1 그레이 상관관계분석(Grey relational analysis)의 적용

다구치 실험계획법을 이용하여 전극 길이, 입력 전압, 축전 용량, 스핀들 회전속도가 미세구멍 가공 시 전극마모, 단락 수, 가공시간, 입구간극에 미치는 영향을 구하였다. 하지만 이를 통해서 WC전극의 미세구멍 가공 최적조건을 구하기에는 복잡한 양상을 보인다. 이러한 난점을 극복하기 위하여 그레이 상관관계 분석을 이용하여 최적조건을 도출하였다^(11~13). 그레이 상관관계는 측정된 결과(original sequence)에 대한 경향을 정량화시키기 위하여 0과 1사이의 값(decimal sequence)을 갖는 계수로 계산하고, 등급(grade)을 결정하여 최적 공정조건을 획득할 수 있는 효과적인 분석법이다. 그레이 상관관계에서 그레이 상관관계등급을 구하기 위해 아래의 식과 같이 각 데이터를 정규화시키는 과정을 거친다. 식 (1), (2), (3)은 데이터가 각각 망대특성, 망소특성, 망목특성을 가지는 경우에 정규화시키는 식이다.

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

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

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{|x_i^o(k) - OB|}{\max\{\max x_i^o(k) - OB; OB - \min x_i^o(k)\}} \quad (3)$$

여기서 $x_i^o(k)$ 는 측정된 고유값(original sequence)이고, OB는 목표치를 의미한다. 정규화를 통해 변환된 변환값 $x_i^*(k)$ 와 가중합수를 고려하여 계수와 등급을 아래의 식을 통해 구할 수 있다.

$$\gamma(x_o^*(k), x_i^*(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (4)$$

$0 < \gamma(x_o^*(k), x_i^*(k)) \leq 1$

$$\gamma(x_o^*, x_i^*) = \sum_{k=1}^n \beta_k \gamma(x_o^*(k), x_i^*(k)) \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^n \beta_k = 1$$

식 (4)는 계수를 식 (5)는 그레이 관계등급을 나타낸다. 여기서 $\Delta_{oi}(k)$ 는 변환 목표값 $x_o^*(k)$ 과 변환값 $x_i^*(k)$ 의 편차를 나타내고, Δ_{\max} 와 Δ_{\min} 은 각각 그 편차의 최대값과 최소값을

의미한다. ζ 는 분배계수(distinguishing coefficient)를 나타내며 통상 0.5로 적용된다.

3.2.2 그레이 상관관계 분석을 이용한 최적조건의 선정

다구치 실험계획법으로 얻어진 입구간극, 전극마모, 단락 수

Table 4 Grey relational coefficients and grade

No.	Grey relational coefficient			Grey relational grade
	Entrance clearance	Electrode wear	Number of shorts	
1	1.0000	0.8409	0.8078	0.8979
2	0.6151	1.0000	0.8422	0.8145
3	0.5686	0.5590	1.0000	0.6510
4	0.8148	0.7197	0.9499	0.8038
5	0.5934	0.5505	0.8288	0.6233
6	0.6245	0.4004	0.6132	0.5326
7	0.3630	0.5674	0.8390	0.5399
8	0.4455	0.3630	0.5932	0.4420
9	0.3648	0.3784	0.3630	0.3699

Table 5 ANOVA

Factor	Degree of Freedom	Sum of Squares	Average sum of Squares	F	Contribution
Length of electrode	2	0.173	0.086	65.9	67.2
Capacitance	2	0.079	0.039	30.1	30.7
Voltage	2	0.005	0.003	-	2.03
Tool rotation speed	2	1.61 E-05	8.07 E-06	-	0.01
Error	0	0	-	-	-
Sum	8	0.257	-	-	100
(Error)	(4)	(0.005)	0.003	-	-

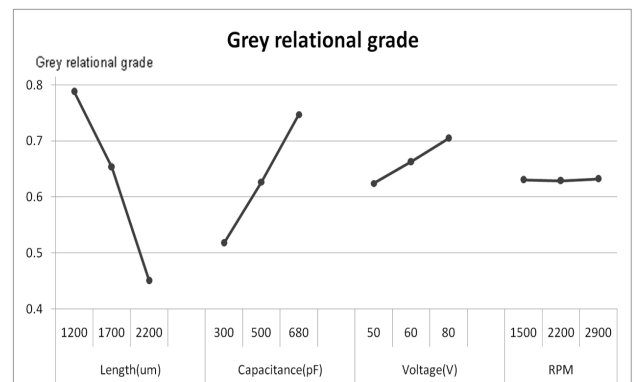


Fig. 3 Plots of factor effect on Grey relational grade

Table 6 Average of total experimental result

Electrode wear (μm)	No. of shorts	Machining time (sec)	Entrance clearance (μm)
629.69	428.89	2,008.89	9.82

Table 7 Average of experimental result under each optimal machining parameters

Optimal condition	Electrode wear (μm)	No. of shorts	Machining time (sec)	Entrance clearance (μm)
electrode length (1,200μm)	512.89	164.3	1,260	8.71
capacitance (680pF)	539.55	181.3	1,340	9.28
voltage (80V)	614.95	156.3	1,360	10.44
tool rotational speed (2,900rpm)	656.5	257.3	1,640	9.52
Average	580.97	189.8	1,400	9.49

Table 8 Results under optimal condition

Machining parameter	Electrode wear (μm)	No. of shorts	Machining time (sec)	Entrance clearance (μm)
Optimal condition	489.94	62	960	9.53
Comparison to Table 5	0.78	0.14	0.48	0.97
Comparison to Table 6	0.84	0.33	0.69	1.00

에 각각 0.4, 0.4, 0.2의 가중치를 주어 구한 그레이 상관관계 등급을 Table 4에, 그 등급의 ANOVA를 Table 5에, 인자효과를 Fig. 3에 보였다. 이렇게 구한 9개의 결과를 다구치 방법으로 전극 길이, 축전용량, 입력전압, 스피들 회전속도의 분산과 요인효과를 분석하여 그림 2와 3에 보였다. 그림 3에서 전극 길이 1,200μm, 축전용량 680pF, 입력전압 80V, 스피들 회전속도 2,900rpm이 WC전극의 미세구멍 최적 가공조건임을 알 수 있다. 그림 2의 anova 분석을 보면 전극의 길이가 가장 큰 영향을 미치고, 정전용량이 두 번째 그리고 전압과 회전속도는 영향이 그리 크지 않음을 알 수 있다. 최적조건에서의 결과값과 비교하기 위하여 두가지 데이터를 얻었다. 첫 번째는 Table 2의 9개 실험값의 결과를 평균한 것으로 Table 6에 주어졌고, 두 번째는 최적조건 각각의 값에서의 결과값과 그 평균으로 Table 7 주어졌다. Table 7의 값은 다구치 방법이 직교배열표

를 이용하여 실험된 결과이기 때문에 가능했으며 Table 3에서 얻어진 결과의 일부이다.

구해진 최적값 전극 길이 1,200μm, 축전용량 680pF, 입력전극 80V, 스피들 회전속도 2,900rpm의 가공조건으로 가공하였을 때의 결과와 Table 6, 7과의 비교결과가 Table 8에 주어졌다. 즉, 그레이 상관관계분석으로 얻어진 최적조건에서 수행된 실험 결과, 최적조건 결과를 일반 조건의 평균값과 비교한 결과, 그리고 다구치 최적조건의 결과의 평균값과 비교한 결과가 표에 주어졌다. 그레이 상관평균 결과를 일반 조건 평균값과 비교하면 전극 마모량이 78%, 단락수가 14%, 가공시간이 48%로 줄어들었다.

입구간극은 97%로 큰 변화가 없었다. 다구치 결과와 비교하면 전극마모량은 84%, 단락수는 33%, 가공시간은 69%로 줄었으며 입구간극은 동일하였다. 그레이 상관관계로 얻은 실험은 전극마모량, 단락수, 가공시간이 줄어드는 결과를 보였는데 특히 단락수가 획기적으로 개선되었다. 그레이 상관관계등급을 결정할 때 입구간극, 전극마모, 단락 수에 각각 0.4, 0.4, 0.2의 가중치를 주어 그레이 상관등급을 구하였는데 가장 작은 가중치를 준 단락수가 가장 많이 개선되었다. 이는 전극마모가 단락수와 연관이 있기 때문으로 분석된다. 단락수가 늘어나면 방전회수도 늘어나고 전극마모량도 늘게 된다. 역으로 단락수를 줄이면 전극마모량도 줄게 된다. 결과적으로 전극 마모량을 줄이려면 단락수를 줄이려는 것이 효과적이다. 그레이 상관관계 등급을 구할 때 전극마모와 단락수에 동시에 가중치를 준 것은 결국 둘 다 단락수를 줄이는 방향으로 작용하여 단락수가 획기적으로 줄어든 것으로 분석된다.

4. 결론

이 연구에서는 마이크로 EDM을 이용한 마이크로 구멍 가공 중에 정밀도를 그대로 유지하면서 생산성을 극대화하는 방법에 대하여 연구하였다.

- (1) 다구치 방법을 이용하여 전극길이, 축전용량, 전압, 회전속도가 가공파라미터에 미치는 영향을 분석하였다. 결과적으로 전극길이가 1,200μm, 축전용량이 680pF일 때 전극마모량, 단락수, 가공시간, 회전속도가 모두 최소가 됨을 밝혔다. 전압과 회전속도는 어떤 파라미터를 선택하느냐에 따라 최적조건이 달라졌다.
- (2) 3개의 파라미터를 최적화하기 위해 그레이 상관관계분석법(Grey relational analysis)을 사용하였다. 입구간극, 전극마모, 단락수에 각각 0.4, 0.4, 0.2의 가중치를 주어 그레이 상관관계 등급을 구하였다.
- (3) 그레이 상관관계 분석법으로 구한 결과는 전체 실험의 평

균값과 비교할 때 전극마모량, 단락수, 가공시간이 각각 78%, 14%, 48%로 축소되었고, 다구치 방법과 비교할 때 각각 84%, 33%, 69%로 축소되었다. 입구간극의 변화는 무시할 정도였다.

- (4) 단락수에 0.2의 가중치만을 주었는데 가장 개선이 있었던 이유는 전극마모량도 단락수와 큰 연관이 있었기 때문으로 분석되었다.

후 기

이 논문은 2011년도 서울시립대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- (1) Ho, K. H., and Newman, S. T., 2003, "State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM)," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 43, No. 13, pp. 1287~1300.
- (2) Masuzawa, T., Fujino, M. and Kobayashi, K., 1985, "Wire Electro-discharge Grinding for Micro-machining," *Ann. CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp. 431~434.
- (3) Masuzawa, T., Kuo, C. L., and Fujino, M., 1994, "A Combined Electrical Machining Process for Micro Nozzle Fabrication," *Ann. CIRP*, Vol. 43, No. 1, pp. 189~192.
- (4) Yu, Z. Y., Masuzawa, T., and Fujino, M., 1998, "Micro-EDM for Three-dimensional Cavities-development of Uniform Wear Method," *Ann. CIRP*, Vol. 47, No. 1, pp. 169~172.
- (5) Kuo, C. L., and Masuzawa, T., 1991, "A Micro-pipe Fabrication Process," *Proc. IEEEMEMS'91*, pp. 80~85.
- (6) Allen, D. M., and Lecheheb, A., 1996, "Micro Electro-discharge Machining of Ink Jet Nozzle: Optimum Selection of Material and Machining Parameter," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 58, No. 1, pp. 53~66.
- (7) Jahan, M. P., Wong, Y. S., and Rahman, M., 2009, "A study on the Quality Micro-hole Machining of Tungsten Carbide Micro-EDM Process using Transistor and RC-type Pulse Generator," *Int. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 209, No. 4, pp. 1706~1716.
- (8) Liao, Y. S., Huang, J. T., and Su, H. C., 1997, "A study on the Machining-parameters Optimization of Wire Electrical Discharge Machining," *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 71, No. 3, pp. 487~493.
- (9) Lin, Y. C., Yan, B. H., and Huang, F. Y., 2001, "Surface Modification of Al-Zn-Mg Aluminum Alloy using Combined Processes of EDM with USM," *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 115, No. 3, pp. 359~366.
- (10) Deng, J., 1989, "Introduction to Grey System," *J. of Grey System*, Vol. 1, No. 1, pp. 1~24.
- (11) Lin, J. L., and Lin, C. L., 2002, "The use of the Orthogonal Array with Grey Relational Analysis to Optimize the Electrical Discharge Machining Process with Multiple Performance Characteristics," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 42, No. 2, pp. 237~244.
- (12) Singh, P. N., Raghukandan, K., and Pai, B. C., 2004, "Optimization by Grey Relational Analysis of EDM Parameters on Machining Al-10% SiCp Composites," *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 155, No. 30, pp. 1658~1661.
- (13) Jung, J. H., and Kwon, W. T., 2010, "Optimization of EDM Process for Multiple Performance Characteristics using Taguchi Method and Grey Relational Analysis," *J. Mech. Sci. Tech.*, Vol. 24, No. 5, pp. 1083~1090.
- (14) Jung, J. H., Lee, H. W., and Kwon, W. T., 2009, "Determination of the Optimal Machining Condition to Maximize the Aspect Ratio of the Micro Hole in EDM Process," *Proceeding of the KSMTE spring conference*, pp. 147~154.
- (15) Seo, D. W., Park, M. S., Yi S. M., and Chu, C. N., 2007, "Machining Characteristics of Micro-EDMed Holes According to Dielectric Fluid, Capacitance and Ultrasonic Vibration," *J. Korean Soc. Prec. Eng.*, Vol. 24, No. 12, pp. 42~49.
- (16) Kim, G. M., Kim B. H., and Chu, C. N., 1999, "Machining Rate and Electrode Wear Characteristics in Micro-EDM of Micro-hole," *J. Korean Soc. Prec. Eng.*, Vol. 16, No. 10, pp. 94~100.