

방전가공에서 전기적 변화가 갖는 방전 특성에 관한 연구

신근하*, 차홍식**

A Study for its Characteristics with Electric Variation in an Electrical Discharge Machining

Sin Keun-Ha*, Cha Huang-Sik**

Abstract

A study is a experiment which is figure out to optimum discharge cutting condition of the surface roughness, electric discharging speed and electrode wear ratio with T_{on} , T_{off} and V (voltage) as an input condition according to the current(I_p) in an electric spark machine :

- 1) Electrode is utilized Cu and Graphite.
- 2) Work piece is used the material of carbon steel.

The condition of experiment is:

- 1) Current is varied 0.7(A) to 50(A) and the time of electric discharging to work piece in each time is 30(min) to 60(min).
- 2) After the upper side of work piece was measured in radius ($5\mu m$) of stylus analyzed the surface roughness to made the table and graph of R_{max} by yielding data.
- 3) Electro wear ratio is:
 - ① Cooper was measured ex-machining and post-machining by the electronic balance.
 - ② The ex-machining of graphite measured by it, the post-machining was found the data from volume \times specific gravity and analyzed to made its table and graph on ground the data.
- 4) In order to keep the accuracy of voltage affected to the work piece was equipped with the A.V.R and the memory scope was sticked to the electric spark machine.
- 5) In order to preserve the precision of current, to get rid of the noise occurred by internal resistance of electric spark machine and to force injecting for the discharge fluid, it made the fixed table for a work piece to minimize the work error by means of one's failure during the electric discharging.

Keywords : surface roughness(표면거칠기), electrode wear ratio(전극 소모비), electric spark machine(방전가공기), voltage(전압), R_{max} (최대높이 거칠기), Cu(구리), carbon steel(탄소강) A.V.R(Automatic Voltage Regulator 자동전압조정기).

* 아주대학교 기계공학과

** 성남기능대학 기계정비기술학과

1. 서 론

일반 汎用기계를 이용한 절삭 가공 중 강도나 경도가 높은 재료에 필요한 형상으로 가공하는 작업은 매우 어려운 가공법이었으나, 방전가공의 발달로 쉽게 가공할 수 있게 되었다.⁽¹⁾ 방전가공은 방전현상을 人工의으로 설정하고 그 에너지를 이용한 가공방법으로 절연성이 있는 방전액 중에서 가공 전극과 공작물 사이에 斷束的으로 방전시켜, 가공전극과 같은 단면의 형상을 공작물에 電寫, 가공하는 방법이다.^(2, 3, 4) 방전기술의 개발은 방전현상을 문자의 刻印가공에만 사용하였던 1800年代 末에서 부터 시작하여 최근에는 CNC화되어 자동 위치검출, 전극 또는 가공물의 회전을 이용한 나사가공, 전극의 다양화, 3차원 윤곽가공, 搖動가공, 스텝(step)가공 등을 할 수 있는 정밀가공기가 제작 사용되고 있다.^(5, 6, 7, 8, 9, 10) 이 가공법은 Cu과 같은 유연한 전극을 사용하여 가공하기 어려운 재료, 즉 경질합금, 耐熱鋼 같은 재질을 절단, 穿孔, 연마 등의 가공에 이용된다. 방전 가공 방식에는 특정 형상의 전극을 사용하여 그 형상을 投影가공하는 型鑄방전 가공 방식과 와이어에 의한 윤곽방전 가공방식이 있으며 방전가공의 특성에 따르는 조건에는 가공전류 및 방전전압 등의 전기 입력조건과 방전 액의 종류와 분사방법, 전극의 재질, 공작물의 재질 등의 기계적 조건이 있다.^(11, 12) 이에 본 연구는 형조 방전가공기를 이용하여 생산현장에서 가장 많이 사용되고 있는 전극인 Cu와 그래파이트(Graphite)⁽¹³⁾를 사용하여 방전가공시 전기적인 입력 조건을 결정하여 방전가공에서의 최적 조건을 究明하고 산업사회에서 그 활용성에 크게 기여 하고져 하였다.

II. 본 론

A. 이론적 배경

1. 가공속도

가공속도는 방전가공에 영향을 주는 因子 중 가장 큰 비중을 갖고 있으며, 방전에너지, 전극과 공작물의 재질에 따른 물리적 성질, 전류의 크기 등이 속도에 영향을 주며, 가공속도 $W^{(14)}$ 는 다음과 같다

$$W = \frac{w_1 - w_2}{t} \text{ (g/min)} \quad (1)$$

(w_1 : 가공전의 중량(g), w_2 : 가공후의 중량(g), t : 가공 시간(sec))

또한 방전 총 가공속도를 해석하면 다음과 같다.

單一 파고 가공 량⁽¹⁵⁾ W_W

$$W_W = K_w \cdot T_{on}^{1.1} \cdot I_p^{1.4} \text{ (Cu, } g/\text{pulse)} \quad (2)$$

(K_w : 상수(9.4×10^{-11} (Cu⁺ - St⁻의 경우)), I_p : 방전 전류 파고치(A), T_{on} : 파고폭(μ s))

실제로 측정된 평균가공속도 W_m

$$W_m = 60W_W \cdot f = K_{wW} \cdot T_{on}^{1.1} \cdot I_p^{1.4} \frac{10^6}{T_{on} + T_{off} + T_w} \text{ (g/min)} \\ = 60 \cdot W_c = 60 \cdot W_a \cdot \epsilon_0 \cdot f \text{ (g/s)} \quad (3)$$

(K_{wW} : 상수(6.64×10^{-9} (Cu⁺ - St⁻의 경우)), f : 방전반복 수($1 \times 10^6 / (T_{on} + T_{off} + T_w)$ Hz),

T_{off} : 파고 휴지폭(μ s), T_w : 전극에 전압을 印加한 다음부터 방전개시까지의 시간(μ s),

W_c : 평균가공속도)

총 가공속도 W_M

$$W_M = \eta \cdot W_1 \cdot N \text{ (g/min)} \quad (4)$$

(W_1 : 1전극의 가공 속도(gf/min), η : 가공 효율(0.6~0.7), N : 분할수)

2. 가공 면의 거칠기

가공전원에서 공급된 전기에너지는 전극과 공작물간의 좁은 공간에서 방전흔을 생성시키며, 방전된 자극의 누적된 결과로 발생된 가공면 위에 방전흔의 집합인 표면거칠기^(14, 16)는 다음과 같다.

$$R_{max} = K_t \times T_{on}^{0.3} \times I_p^{0.4} \quad (5)$$

(R_{max} = 최대 높이 표면 거칠기(μ m),

K_t = 상수{2.3(Cu⁺ - St⁻의 경우)})

용접이 높은 재료에서는 동일 방전에너지에 대한 면거칠기가 좋으며 초경합금은 담금질한 강에 대해 1/2정도의 좋은 거칠기를 얻을 수 있으나 가공속도는 저하된다.

3. 전극소모량

Cu전극을 양극으로 하여 Cu를 가공할 때 방전의 파고 가 길면 전극소모가 감소하며, 이 경우 전극의 표면은 가공 액의 열분해에 의해 생성된 탄화물(그래파이트, 탄소

및 가공침이 혼합된 것) 및 가공물에 있는 구리가 석출하여 흑색의 피막이 생성되어 부착되어 있어 전극의 방전점이 넓고 전류 밀도가 저하하여 전극 표면의 침적물이 파손되지 않기 때문에 탄화물과 공작물 사이에서 방전이 계속되어 전극을 보호하여 되기 때문에 전극 소모를 방지한다. 또 가공 액을 강하게 분사하여 피막을 발생치 않도록 하면 전극의 소모는 증가하나 표면거칠기가 좋아진다. 전극 소모량에 영향을 주는 주 인자는 방전에너지(시간특성)와 극성, 전극 재료, 가공 액 상태 등이며 전극 소모량은 방전에너지와는 직접적인 관계는 없으나 전극재료의 물리적 상수와 관계가 있어 반복 방전시 에너지와 일정한 관계가 이루어지며, 전극의 소모량을 방전가공된 공작물의 소모량으로 나눈 값을 전극 소모비^(15, 17)라 표시한다.

$$\text{전극 소모비} = \frac{\text{전극의 소모량}(g_t)}{\text{공작물의 소모량}(g_p)} \quad (6)$$

전극소모비의 값이 작을수록 전극은 소모되지 않는 것이며 소모량은 전극과 시편의 가공전후의 중량을 전자저울로 측정한다. 그러나 그래파이트를 전극으로 사용했을 경우는 예외로 방전가공 중에 방전액, 각종 오일의 침투 등으로 중량 측정이 불확실하기 때문에 전극의 소모된 길이와 가공깊이의 비율 즉, 체적×비중으로 중량을 계산하여 구한다. 소모 감소 효과는 동 및 그래파이트에 가장 현저하게 나타나며, 전극의 저 소모 현상의 전기적 조건으로는 파고폭이 깊고, 방전 전류파고값이 낮으며, 극성이 역극성일 경우에 발생되는데 이런 조건에서는 전극소모비를 1% 이하로 할 수 있고 이 값보다 큰 파고폭일 때는 저소모로 가공되어 전극의 소모비가 낮아져, 전극소모량은 T의 범위에 따라서 아래와 같이 분류⁽¹⁵⁾된다.

1) $T_{on} > KI_p^{2.6}$: 저 소모 영역으로 파고폭이 증가함에 따라 단일파고 전극 소모량이 감소되는 범위이다.

$$e_1 = K_{e1} \times T_{on}^{-0.7} \times I_p^{2.6} \quad (7)$$

(e_1 = 단일 파고 전극 소모량(g/pulse), K_{e1} = 상수 (3.3×10^{-10} (Cu⁺ - St의 경우)))

2) $T_{on} < KI_p^{2.6}$: 파고폭이 증가함에 따라 단일 파고 전극 소모량이 증가되는 범위이다.

$$e_2 = K_{e2} \times T_{on} \times I_p^{1.2} \quad (8)$$

(e_2 = 단일 pulse 전극 소모량(g/pulse), K_{e2} = 상수 (9×10^{-12} (Cu⁺ - St의 경우)))

B. 실험機器 및 실험방법

1. 실험기기

1). 방전가공 실험장치

본 실험에서 사용한 방전 가공기는 한국 進榮精機에서 제작한 장비로서 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of experiment equipment

Equipm ent	Description and specification		
	Item	Unit	Specification
Electric discharge M/C (JCE-45A)	X axis transfer range	mm	350
	Y axis transfer range	mm	250
	Z axis transfer range	mm	300
	Work tank	mm	1000×700×400
	Ram swing	mm	700
	Work tank capacity	l	500
	Work maximum weight	kg	800
	Electrode maximum weight	kg	100
	Machine size	mm	1820×1520×2800
	Machine weight	kg	2000

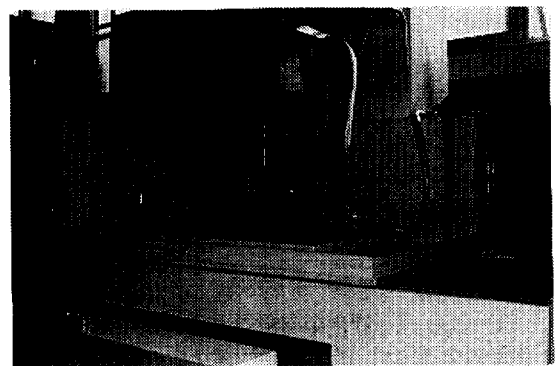


Photo. 1 Experimental apparatus for electrical discharge M/C

2). 표면거칠기 실험장치

본 실험에서 사용한 표면 거칠기 실험장치는 일본 MITUTOYO제품으로 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of surface roughness experiment equipment

Equipment	Description and specification		
	Item	Unit	Specification
Surface roughness M/C (SURFTTEST-402)	Limit indication	R _{max}	50
	Cut off value	mm	0.25~2.5
	Basic range	mm	0.25~30
	Driving speed	mm/s	0.5~1
	Temperature	℃	5~40
	Mass	kg	1.5
	Detector	No.	178-350

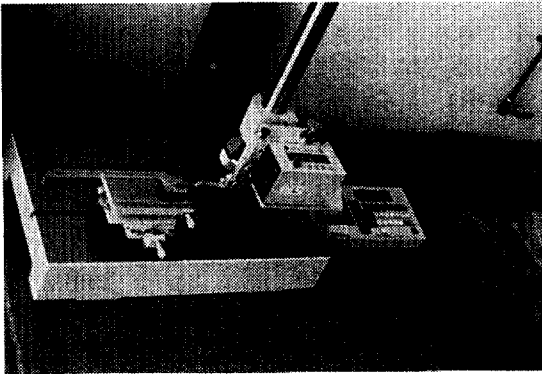


Photo. 2 Experimental apparatus for surface roughness measurement

3) 메모리 스크프(Memory scope)

본 실험에서 사용한 메모리 스크프는 국내 LG전자 제품으로 사양은 Table 3과 같다.

Table 3 Specification of memory scope experiment equipment

Item	Model	OS - 3020
CRT		6inch 1.9kw
Vertical deflection frequency band wide		DC ~ 20MHz
Vertical deflection accuracy		Normal: ±3%, Zoom : ±5%
Vertical deflection input impedance		Aprox. 1MΩ in parallel capacity 25PF
Digital storage maximum sampling ratio		20Ms/s

2. 전극 및 시편

1) 전극 및 시편 가공 실험기기

본 실험에 사용된 전극 및 시편 가공 기계는 화천기공사에서 제작한 스윙(swing)380의 선반(lathe)과 ISO 50의 밀링을 사용하였다.

2) 실험용 전극

(1) 재질

본 실험에 사용한 전극 그래파이트와 Cu의 재질에 따른 규격은 Table 4와 같으며 이것은 일본 TOYO사 제품의 수입상인 동양탄소 주식회사와 국내 정경(주) 발행한 재료시험 성적이다.

(2) 가공

본 실험에서 사용된 전극은 Cu φ25를 φ20으로 선반가공하였고, 그래파이트는 사각재를 φ20으로 가공하였다. 또한 전극의 길이는 물림 길이20(mm), 방전 가공길이 30(mm)로 하였다.

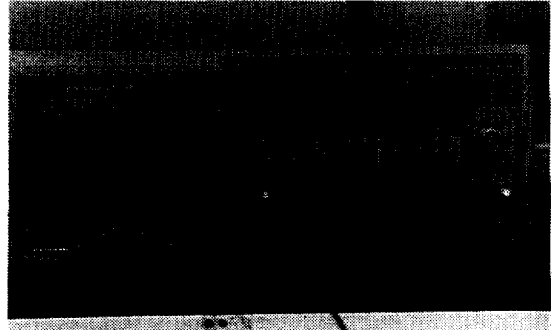


Photo 3 Experimental apparatus for memory scope measurement

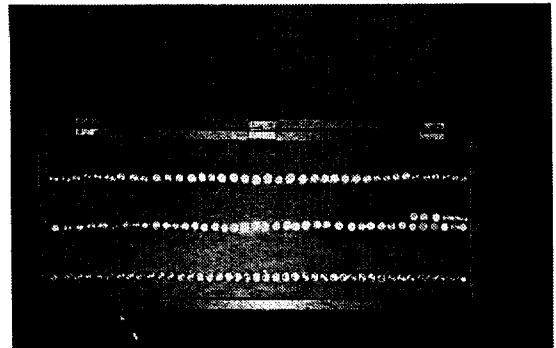


Photo 4 Electrode

Table 4 Material test result

Manufactured name	Graphite for E.D.M	Cu-1/2H	
Quality	# ISEM - 3	CA110-JK 950821	
Item / Size	25×160×280	φ25×2000	
Density	g/cm ²	1.84	
Hardness	(Shore)	61	
Elect resistance	μΩcm	940	99.5
Flex strength	kg/cm ²	500	
Comp strength	kg/cm ²	10100	
Plaster		0.03	
Tensile trength	(kg/mm)		26.8
Chemical composition(in wt%)			99.92

3. 실험방법

본 실험을 위한 조건과 실험방법은 다음과 같다.

1) 전기조건 및 방법

전류량 I_p(A)는 0.7에서 50(A)까지, 16등분을 저전류에서는 1~2, 고 전류에는 10(A)간격으로 입력하여 가공하였으며, 시편에 더해지는 전압의 정밀도를 위해 자동전압조정기를 설치하여 안정되고 정확한 전압을 공급하였으며, 메모리 스크프를 방전 가공기에 부착하여 전압에 따른 파고시간 T_{on}과 T_{off}의 입력조건을 확인하고, 전류의 크기에 대한 정확성을 위해 방전가공기 자체내의 내부 저항 등의 노이즈(noise)를 없애고 방전액을 강제분사 시키기 위해 시편 고정 테이블을 제작 사용하여 가공하였으며, 전극을 양극, 시편을 음극으로 전원을 연결하는 역극성으로 실험하였다.

2) 측정방법

본 실험의 방전가공시간은 최저속 가공시 60분, 고속 가공시 20분으로 설정하는 등 20분에서 60분간 가공하였으며, 표면거칠기는 시편의 上面을 Radius 5μm의 축침식 측정침(stylus)로 측정하였고, 전극의 소모비는 전극과 시편의 가공전후의 중량을 전자저울과 체적에 의한 중량 계산법을 이용하여 중량에 대한 data를 table 6과 Fig 1, 2, 3으로 작성하여 비교 분석하였다.

3) 시편

(1) 재질

시편의 화학성분과 기계적 성질⁽¹⁶⁾은 Table 5와 같다.

(2) 가공

본 실험에 사용된 피삭재는 SM45C 평철을 밀링을 이용하여 □40으로 가공하였다.

Table 5 Chemical composition and mechanical properties of the testing materials

Materials	Chemical composition					Tensile strength (kg/mm ²)	Yield strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
	C	Si	Mn	P	S			
SM45C	0.45	0.23	0.56	0.02	0.006	105	95	13

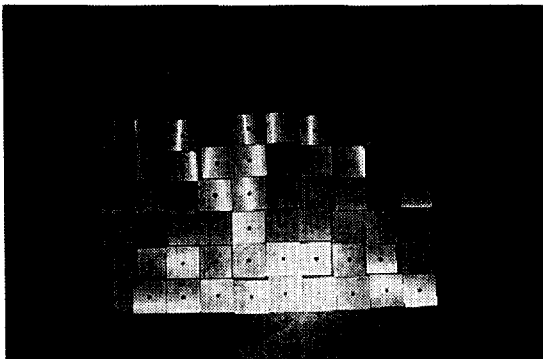


Photo 5 Work piece

C. 실험결과 및 고찰

1. 전류 변화에 따른 방전가공의 분당 방전량 특성

Fig. 1에서와 같이 방전가공기의 분당 방전 량의 실험 결과는 전류 값의 증가에 따라 분당 방전 량이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 실험 결과와 식 (2)를 같이 고찰하여 보면 전류 값 I_p가 3(A)일 때까지는 방전 량이 거의 없어 최저속으로 가공이 되며, 20(A) 이상부터는 급속 방전이 되는 것을 알 수 있었다. 이것은 방전가공 속도와 전류의 관계가 지수함수인 관계로, 전류값이 증가될 때 작은 전류 값 보다 높은 전류 값에서 가공속도의 차이가 급격히 증가한다고 고찰할 수 있다. 두 전극을 비교하여 보면 전극의 차이는 저 전류에서는 속도에 대한 차이를 갖고 있지 않으나, 고 전류 값일수록 각각의 변화가 달라지며 그래프 이트전극 사용이 Cu를 전극으로 사용한 경우에 비해 방전 속도가 빠름을 알 수 있었다. 또한 같은 전류값 이라도 방

전 가공속도가 같거나 또는 상이한 값을 보여주는 것은 파괴시간과 전극의 물리적 성질, 방전액, 에너지 밀도 등이 방전가공 속도에 영향을 주기 때문이라고 사료된다.

Table 6 Cu⁺ - ST⁻ & GR⁺ - ST⁻ wear

NO.	Machining condition I _p (A)	Cu ⁺ - ST ⁻			GR ⁺ - ST ⁻		
		Machining speed (μ/min)	Roughness (μm)	Wear rate (mm ³ /min)	Machining speed (μ/min)	Roughness (μm)	Wear rate (mm ³ /min)
1	0.7	0.0690	5	12.08	0.0690	6	17.00
2	1.5	0.0690	7	12.00	0.0690	7	12.00
3	2.2	0.0691	10	17.29	0.0690	7	12.00
4	3.0	0.0920	16	16.98	0.0920	15	16.00
5	5.0	0.0610	23	8.94	0.0890	22	8.20
6	6.0	0.0800	25	3.64	0.1200	29	3.20
7	8.0	0.1460	32	3.58	0.3800	34	3.10
8	10	0.2350	35	3.29	0.2900	36	3.10
9	12	0.2630	38	3.29	0.2900	47	3.00
10	16	0.4750	34	3.39	0.6350	35	0.60
11	20	0.7130	65	3.00	0.8050	39	0.60
12	30	2.0500	82	1.26	1.7200	75	0.60
13	40	2.6600	97	1.20	2.6000	105	0.50
14	50	3.3000	110	0.40	3.3000	110	0.50

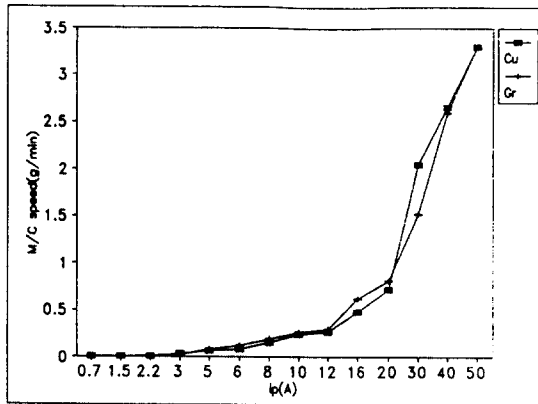


Fig. 1 The relation of using Cu⁺ ,GR⁻ current I_p and working speed wear.

2. 전류 변화에 따른 방전가공편의 표면거칠기 특성

Fig. 2에서와 같이 전류의 값이 증가하면 표면거칠기는 거칠어짐을 알 수 있다. I_p가 10(A)일 때 두 전극의 표면거칠기 결과치는 거의 같은 결과를 보여주고 있으며 그 이후부터는 상이한 결과 값이나 전류가 증가할 수록 표면 거칠기는 거친 상태로 나타났으며, 두 전극 모두 같은 기공기 값의 변화를 보이고 있으며 이것은 전류 값과

표면거칠기 값은 비례하기 때문이라고 고찰되며, Cu로 전극을 사용한 조건 보다 그래파이트를 전극으로 사용한 조건이 표면거칠기 값이 크게 나타난 결과를 보여주고 있는 것은 그래파이트전극이 가공속도는 빨리 할 수 있으나 표면 거칠기의 값이 커져 면의 정도는 거칠어진다고 판단할 수 있으며, 가공속도와 표면 거칠기는 비례한다고 예상되어 진다. 즉, 전류 I_p가 커지면 방전 가공속도가 빨라지나 가공 표면은 거칠어짐을 판단할 수 있었다. 또한 전류 파고값이 20(A) 이상일 경우 그래파이트의 기공기 값이 변화가 심한 것을 볼 수 있어 이 이상의 전류값에는 불안한 결과를 초래한다고 사료된다. 이상과 같은 표면 거칠기의 실험 결과를 KSB 0161과 비교하여 보면 방전전류 파고 값 I_p가 1.5(A)보다 작을 때 표면 거칠기 값이 7(μm)이하로 결과를 나타내어 표면 거칠기 기호(▽▽▽), 정도 1.6S~6.3S에 해당되어 가공 흔적이 거의 남지 않는 극히 평활한 상다듬질 상태에 해당되고, I_p 8(A)이하일 때 표면 거칠기는 30(μm)이하로 기호(▽▽), 정도 12.5S~25S에 해당되어 가공흔적이 남지 않을 정도의 보통 다듬질 상태의 가공이 되며, I_p 10(A)이상일 때 그 결과는 28(μm)이상으로 기호(▽), 정도 35S~100S에 해당되는 가공흔적이 남을 정도의 거친 다듬질 상태가 됨을 알 수 있었다.

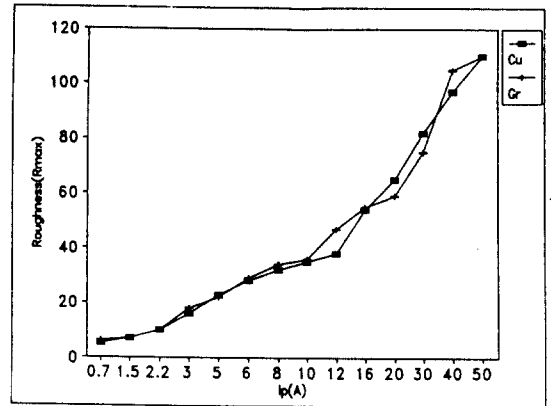


Fig. 2 The relation of using Cu⁺ ,GR⁻ current I_p and roughness of wear.

3. 전류 변화에 따른 전극소모비의 특성

Fig. 3에서는 전류 I_p(A)가 클수록 전극소모비는 적은 것으로 나타났다. 이것으로 방전 가공속도 및 표면거칠기의 값과는 상반되게 전류의 값과 전극 소모량은 반비례한다는 것을 알 수 있으며 곧, 가공속도, 표면거칠기와도 반

비례한다고 판단되며, 가공속도나 표면거칠기와 같이 일률적인 기울기를 갖는 선으로 나타나지 않고 일부 변화가 있는 선으로 표시되는 것은 전극의 소모비는 전기조건보다 전극의 고유 물리적 성질 등에 의하여 발생되었다고 사료된다. 물론 양극과 음극의 에너지 분배 비율이 I_p 와 T_{on} 에 의해 변화되므로 전기적 조건을 무시할 수 없으며 또한 영향을 받고 곡선자체가 전류의 크기 증가에 따라 (-)기울기 값을 갖는다고 판단 되어 진다. 특히 5, 12(A)에서의 전류에 따른 전극소모의 변화는 상당히 다른 결과를 나타내고 있는데 이것은 전극소모량은 방전 액이 열분해하여 생성된 탄화물이 전극 면에 부착하여 이 탄화물과 공작물사이에서 방전이 계속되기 때문이며, 이런 조건하에서는 전극(+극)의 방전점이 높고 전류밀도가 저하여 (+)극 표면에 침적물이 파손되지 않기 때문에 전극의 소모가 감소되는 것이라고 사료된다.

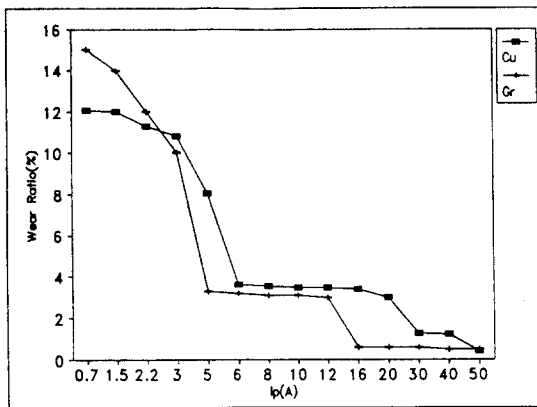


Fig. 3 The relation of using Cu^+ , GR^- current I_p and electrode wear ratio of wear.

III. 결 론

본 연구에서는 SM종류의 재료를 Cu와 그래파이트의 전극을 사용하여 전류에 변화를 주어 실험하였으며, 그 결과 방전속도, 표면거칠기, 전극소모비의 특성을 분석한 전류 량에 따른 최적 방전조건은 다음과 같다.

1. 방전 전류 파고 값을 높이면 분당 방전량이 많아져 가공속도를 빨리 할 수 있으며, 표면조도값 R_{max} (μm)이 커진다. 또한 전류 값이 20(A) 이상 일 때

는 방전속도와 표면거칠기의 값이 급격히 증가되며 방전이 불안정한 것으로 나타났다.

2. KS규정에 따른 표면 거칠기는 방전 전류 파고 값 I_p 1.5(A) 까지는 표면거칠기 정도 1.6S~6.3S에 해당되어 극히 평활한 상 다듬질 상태, I_p 8(A)이하일 때 표면거칠기 정도 12.5S~25S에 해당되어 보통다듬질 상태이며 I_p 10(A) 이상일 때 표면 거칠기 정도 35S~100S에 해당되어 거친 다듬질 상태임이 비교되었다.
3. 전극의 소모는 전기조건외의 직접적인 영향을 받지 않으며 전극 재료의 물리적 요소에 의해 설정되는 것으로 이해되나 전류와의 관계는 간접적인 영향을 받게 되며 전류가 커짐에 따라 전극은 저소모량이 되었다.

참 고 문 헌

1. 型技術協會, 型技術便覽, 日刊工業新聞社, pp955~958, 1992
2. 國技正典, "放電加工における放電点分布の觀察", JSPE Vol.57, pp9~11, 1991
3. 齊藤長男, ワイヤカット放電加工技術, 日刊工業新聞社, pp12~128, 1983
4. 鹽田泰仁, 放電加工ワイヤカット, 日刊工業新聞社, pp2~14, 1990
5. 古谷克可 외 2인, "超小型放電加工機の開發", 日本精密工學誌, Vol.57, No.5, pp66~171, 1991
6. 齊藤長男, "放電加工法による高速微細加工の技術動向", 機械技術, Vol.36, No.2, pp18~25, 1992
7. 木下夏夫, "放電加工の研究開發技術動向", JSPE, Vol.157, No.6, pp5~7, 1991
8. K. P. Rajukar and W.M. Wang, "A New Model Reference Adaptive Control of EDM", CIRP Vol.38, No.1, pp183~186, 1989
9. T. Masuzawa, "Drilling of Deep Microholes by EDM", CIRP Vol.38, No1, pp195~198, 1989
10. D.Kremer, "Effects of Ultrasonic Vibrations on the Performances in EDM", CIRP, Vol.38, No1, pp199~202, 1989
11. 木本保夫, "銅電極による電極低消耗の放電加工", 精密機械, Vol.33, No.6, pp379~385, 1967
12. 木本康雄, 田官勝臣, 田畑英彦, "超硬質合金放電加工

- の電極消耗放電加工の研究”, 日本造船技報, Vol.35, No.1, pp1~7, 1975
13. Thomas I. Drozda, Charles Wick, “Tool and Manufacturing Engineers Handbook(vol-Machining)”, Society of Manufacturing Engineers One SME Drive, No.14, pp42~63, 1988.
14. 高木六彌, 金型工作法, 機電研究社, pp230~250, 1975
15. 柳濟九, 放電加工, 大光書林, pp12~65, 1988
16. KS D 3752, 1991
17. 김창호, 방전가공, 機電研究社, pp47~98, 1992