한국공작기계기술학회 '96년도 춘계학술대회 논문집 pp 132~136

방전가공에서 전기적 變化가 갖는 방전 특성에 관한 연구

신 근 하, 차 흥 식

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

Sin Keun-Ha, Cha Heang-Sik

ABSTRACT

A study is a experiment which is figure out to aptimum discharge cutting condition of the surface roughness, electric discharging speed and electro wear ratio with Ton, Toff and V(voltage) as an input condition according to the current(Ip) in an electric spark machine ;

1)Electrode is utilized Cu(coper) 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).

2)Pulse time(Ton) is varied 3(μs) to 240(μs) and also Toff is varied 7(μs) to 20(μs).

3)The time of electric discharging to work piece in each time is 30(min) to 60(min).

4)After the upper side of work piece was measured in radius (5μm) of syulus analyzed the surface roughness to made the table and graph of Rmax by yielding data.

5)Electro wear ratio is;

①Coper was measured ex-machining and post-machining bu the electronic balance.

②The ex-machining of graphite measured by it, the post-machining was found the data from volume × specific gravity and analyzed to made its table and graph on ground the data.

6)In order to keep the accuracy of voltage affected to the work piece was equipped with the A.V.R (Automatic Voltage Regulator).

7)The memory scope was sticked to the electric spark machine.

8)In order to preserve the precision of current, to get rid of the noise occured 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.

According to above results, the surface roughness by the variation of electrodw and current was analyzed to compare KS(Korea Standards).

It was decided the optimum condition of electric discharge cutting through analyzing the effect of electric discharge speed and electro wear ratio.

Ⅰ. 序論

일반 汎用機械에 높은 强度나 硬度을 갖는 소재를 복잡한 형상으로의 가공은 매우 어려운 상황이다. 그러나, 방전가공의 발달로 이런 가공이 가능하게 되었으며 銅(Cu)과 같은 柔軟한 전극을 사용하여 硬質合金, 耐熱鋼 같은 재질의 切斷, 穿孔, 硏磨 등의 가공에도 힌지한 성능을 발휘하게 되었다.

방전현상을 文字의 刻印 가공에만 사용하였던 1800 년대末에서 부터 시작하여 1943년 RC 회로에 의한 방전 가공기를 개발하여 금속에 구멍을 뚫는데 성공하게 되었으며 1970년대 전반에 이르러서는 Transistor 등의 발전에 따라 超다듬질 領域까지 방전가공이 가능하게 되었다. 현재 방전가공의 용도는 특수한 부품가공도 가능하도록 加工 領域이 확대되고 방전 인삭가공 까지도 연구되고 있으며, 最近 방전가공법의 개발은 CNC化 되어 자동 位置檢出, 전극 또는 가공물의 회전을 이용한 螺絲가공, 3차원 輪廓가공, 搖動가공, STEP가공 등을 할 수 있는 정밀 가공기가 제작되어 사용되고 있는 등 金型제작에 對한 방전가공의比重은 매우 크다.

방전가공은 방전현상을 人工的으로 設定하고 그 energy를 이용한 가공방법으로 絶緣性이 있는 방전액 중에서 가공전극과 공작물과의 사이에 圖束的으로 방전시켜, 가공전극과 같은 斷面의 형상을 공작물에 전사, 가공하는 방법이다.

방전가공 방식에는 特定形狀의 전극을 사용하여 그 형상을 投影가공하는 型彫방전 가공방식과 wire에 의한 輪廓方式이 있으며 방전가공의 특성에 따르는 조건에는 가공전류 및 pulse time, 방전전압 등의 전기 입력 조건과 방전액의 종류와 噴射 방법, 전극의재질, 공작물의 재질 등의 기계적 조건이 있다.

그러나 방전가공의 조건 중 가장 큰 영향을 갖는 조건인 전기적 조건은 국내에 제작 사용 되고 있는 각종 型彫 방전가공기를 이용하여 실제 가공하고자 할 때 이 조건들에 따른 data가 局部的으로 발표되어 있으며 體系化 되어 있지 않고 있어 경험에 따른 가공을 하고 있는 것이 현실이다.

이에 본 논문은 가장 많이 사용되고 있는 전극인 銅 (Cu)과 Graphite를 사용하여 방전 가공기를 이용한 부품 및 금형가공시 필요한 조건을 작업자가 요구하는 방전가공속도, 표면조도, 전극소모비를 위한 전류의 입력조건을 결정하여 최적 방전조건을 얻고저 하였다.

Ⅱ. 實驗機器 및 實驗方法

Ⅱ-1. 實驗裝置

本 실험에서의 방전 實驗裝置는 韓國 進榮精機에서 제작한 J C E 기종을 사용하였으며, 表面粗度 實驗裝置는 日本國 MITUTOYO제품이다. 또한 本 實驗에서 電壓 V에 따른 T_{on}과 T_{off} 의 實驗 數値를 確因하였던 memory scope는 國內 LG電子 제품의 것을 사용하였다. 그밖에 전자 저울, Lathe, Milling M/c, Drilling M/C등이 이용되었다.

Ⅱ-2 電極 및 試片

(a)실험용 전극

本 실험에 사용한 전극 Graphite의 기계적성질은 Table 1과 같으며, Cu의 성분 및 성질은 Table 2와 같다.

전극의 가공은 Cu φ25를 φ20으로, Graphite는 四角材를 φ20으로 가공하였다.

(c) 試片

본 실험에서 사용 된 試片은 SM 45C로서 化學成分과 기계적 성질은 Table 3과 같으며 試片의 길이는 불럼 길이 20, 방전 가공길이 30(mm)로 하였다.

Ⅱ-3 실험방법

본연구는 방전가공기에서 전극은 Cu와 Graphite, 시편은 SM系의 재료를 사용하여 다음과 같은 조건으로 실험하였다.

(1)전류량 IP(A)는 0.7에서 50(A)까지,

Table 1 Material test result of graphite

Material test result	
Manufactured name	GRAPHITE
Quality	# ISEM - 3
Item \ Size	25×120×200 25× 65×255
DENSITY g/cm^2	1.84
HARDNESS (Shore)	61
ELECT RESISTANCE μΩcm	940
FLEX STRENGTH kg/cm^2	500
COMP STRENGTH kg/cm^2	10100
PLASTER	0.03

Table 2 Material test result of Copper

MATERIAL TEST RESULT		
Material : CA110 Condition : 1/2H Chemical Element:Cu	Tensile Strenegth (kg/mm)	Electrical Resistivity
Dimension	min 25	98
φ25×2000	26.8	99.5
Chemical Composition(in wt%)		
Element \ Spec	Cu	
Lot no	min 99.9	
JK 950821	99.92	

Table 3 Chemical compsition and Mechanical properties of the testing materials

CHEMICAL COMPSITION					Tensile Strength (kg/mm^2)	Yield Strength (kg/mm^2)	Elongation (%)
C	Si	Mn	P	S			
0.45	0.23	0.56	0.02	0.06	0.05	95	13

(2)Pulse time Ton은 3에서 240 (μsec)까지, Toff는 7에서 20(μsec)까지

(3)1개의 시편에 대한 방전가공시간은 30~60분간,

(4)표면조도는 시편의 上面을 Radius 5μm의 촉침식 stylus로 측정, data를 table화 하여 Rmax의 table을 Quattro Pro에 의해 graph로 작성.

(5)전극의 소모비는

①Cu와 시편은 가공전과 가공후를 전자저울로,

②Graphite는 방전가공 중에 방전액, 각종 oil의 陷沒 등으로 중량측정이 불확실하기 때문에 가공전은 전자저울로, 가공후는 체적×비중으로 계산하여 data를 구하고 이를 표와 grapha로 작성.

(6)시편에 加해지는 전압의 정밀도를 위해 자동전압조정기를 설치하여 안정되고 정확한 전압을 공급하였고,

(7)Memory scope를 방전 가공기에 부착하여 전압에 따른 Pulse time Ton과 Toff의 입력조건을 확인하였고,

(8)전류의 크기에 대한 전확성을 위해 반전가공기 자체내의 내부저항 등의 noise를 없애고 방전액을 강제분사 시키기 위해 시편 고정 table을 제작 사용하였으며

(9)전극을 +, 시편을 - 로 전원을 연결하는 정극성으로 실험하였다.

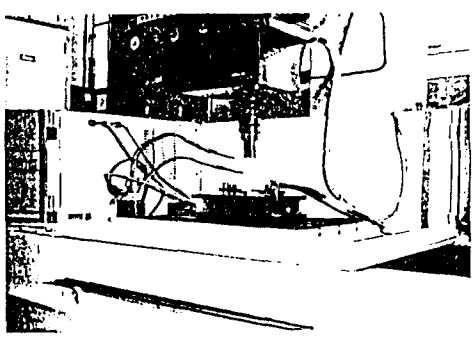

Photo 1 Experimental apparatus for electrical discharge M/C

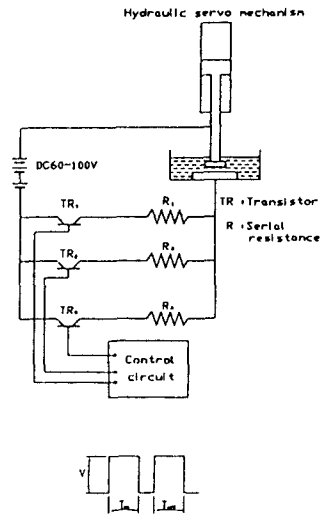

Fig.1 Scheatic diagram of the transistor power circuit & pulse

Ⅲ. 實驗結果 및 考察

Ⅲ-1 電流 變化에 따른 방전가공의 分當방전량 特性

Fig 2에서와 같이 방전 가공기의 分當 방전량의 실험은 전극을 Cu나 Graphite로 사용하였을 때 전류값의 증가에 따라 分當방전량이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 加工速度는 방전 energy, 전극과 공작물의 재질에 따른 물리적 성질, 전류의 크기 등이 영향을 준다. 이 속도는 방전 가공의 能率 표시의 기준으로 단위시간당의 제거량 즉, 시편에서 방전 가공된 량을 重量으로 表示하여 g/min으로 나타낸다.

$$W = \frac{\omega_1 - \omega_2}{t} \ (g_f/min)$$

[ω_1 : 加工前의 重量(g_f),
ω_2 : 加工後의 重量(g_f) t : 가공시간(sec)]

실험 결과를 고찰하여 보면 전류 값이 3 (A) 일 때 까지는 방전량이 거의없이 最 低速으로 가공이 되는 것을 알수 있었다.

전극을 Cu나 Graphite로 사용하였을 때 방전 속도의 增加폭은 多少 相異하나 增加하며 Cu는 12(A) 이상에서 증가 되며 Graphite는 25(A)이상에서 급격히 증가 됨을 알 수 있다. 방전량의 증가는 12(A)까지 같은 기울기값으로 緩慢한 가공속도의 증가를 보이고 있으며, 그 이상 부터는 급진적으로 변화되는 것을 알 수 있었다. 또한 전극을 Graphite로 방전가공하는 것 보다 Cu로 가공하는 것이 더 급진적 가공속도의 변화가 되는 것을 알 수 있었다. 이것은 다음과 같은 이론적 배경에 의해 고찰된다.

(1)방전 Energy 와 가공속도와의 關係는 單一 pulse 가공량 W_W와 pulse幅, 방전전류 波高値와의 관계식으로 나타낸다.

$$W_W = K_w \cdot T_{on}^{1.1} \cdot I_p^{1.4} \ (g_f/pulse)$$

[K_w : 常數, 9.4×10^{-11}($Cu^+ - St^-$의 境遇)]

(2)W_W와 實際로 측정한 평균가공속도W_m와의 관계는 다음과 같다.

$$W_m = 60 W_W \cdot f = K_{WW} \cdot T_{on}^{1.1} \cdot I_p^{1.4} \frac{10^6}{T_{on}+T_{off}+T_w} \ (g_f/min)$$

[f : 주파수(Hz), T_{off} : pulse 停止 폭(μs),
T_w : 전극에 전압을 印加한 다음 부터 放電開始 까지의 시간(μs),
K_{WW} : 常數, 6.64×10^{-9}($Cu^+ - St^-$의 境遇)]]

(3)放電 energy ε_0 와 單一pulse 加工量 W_G와의 關係는 다음과 같다.

$$W_G = W_a \cdot \varepsilon_0 \quad (g_f/pulse)$$

[W_a : energy당 加工量(g_f/J) $= T_{on}^{0.1} \cdot I_p^{0.2} \fallingdotseq 0.01 \sim 0.03$]

(4)放電 energy와 총 平均加工速度 W_m는 다음과 같다.

$$W_m = 60 \cdot W_c = 60 \cdot W_a \cdot \varepsilon_0 \cdot f \quad (g_f/min)$$

[f : 放電 反復數(Hz) $= 10^6/(T_{on}+T_{off}+\tau_0)$,
W_c=實測에 의한 單位時間當 平均 加工速度(g_f/s)]

(5)總 加工速度 W_M는 다음과 같다.

$$W_M = \eta \cdot W_I \cdot N \quad (g_f/min)$$

[η : 加工效率(0.6~0.7), N : 分割數,
V : 放電 開始 電壓(V)]

이상과 같이 전류와 방전 속도는 지수함수인 관계로 전류값이 증가 될 때 작은 전류값 보다 높은 전류값에서 가공속도의 差異가 급격히 증가 한다고 사료된다.

또한 12 (A) 이후 부터 급진적으로 변화되 것은 Cu의 IP가 10 (A)일 때 Ton은 20, Toff는 15, IP가 12(A) 일 때 Ton은 30, Toff는 15, IP가 16(A)일때 Ton은 62, Toff는 30으로 실험하였는바, 이는 Toff 폭이 길면 가공속도가 저하되며, 이것은 방전 혼적의 電流密度에서 pulse폭이 길고 전류密度가 낮아서 방전 전압이 낮아지기 때문에 용융금속을 충분히 飛散시킬 수 없어서 이 금속이 많이 남게되어 방전속도가 低下되는 것으로 판단 되었다. 즉 같은 전류값이라 할지라도 Ton과 Toff의 크기에 따라서 가공속도 즉, 분당 방전량이 변화하는 것으로 사료된다.

Table 4 Cu - ST Wear

NO	Machining Condition				Machining Speed (g/min)	Roughness (μRmax)	Wear Ratio (%)
	Ton	Toff	IP (A)	LV (V)			
1	3	7	0.7	40	0.0009	5	12.08
2	5	7	1.5	40	0.0030	7	12.00
3	9	9	2.2	40	0.0031	10	11.29
4	9	9	3.0	40	0.0200	12	10.80
5	12	12	5.2	40	0.0720	19	10.50
6	20	12	6.0	40	0.0900	23	7.41
7	20	15	10.5	40	0.1650	26	6.38
8	30	15	12	40	0.21	31	5.13
9	62	30	16	35	0.492	54	3.39
10	77	20	20	35	0.713	65	3
11	77	30	26	35	0.776	78	2.89
12	157	20	35	40	2.05	82	1.26
13	157	20	40	30	2.66	97	1.2
14	240	20	50	30	3.3	110	0.4

Table 5 GR - ST Wear

NO	Machining Condition				Machining Speed (g/min)	Roughness (μRmax)	Wear Ratio (%)
	Ton	Toff	IP	LV (V)			
1	10	10	0.75	40	0.001	6	15
2	10	10	1.50	40	0.005	7	14
3	10	10	2.25	40	0.006	10	12
4	20	20	3.00	40	0.025	14	10
5	20	20	5.25	40	0.080	20	8
6	30	10	6.00	40	0.120	29	3.2
7	20	20	10.5	40	0.200	28	8
8	20	10	12	35	0.220	31	7
9	20	10	16	35	0.27	39	7
10	20	10	20	35	0.35	44	6
11	20	10	26	35	0.55	55	6
12	200	20	30	30	1.52	75	0.6
13	240	20	45	30	2.6	105	0.5
14	240	20	50	30	3.3	110	0.5

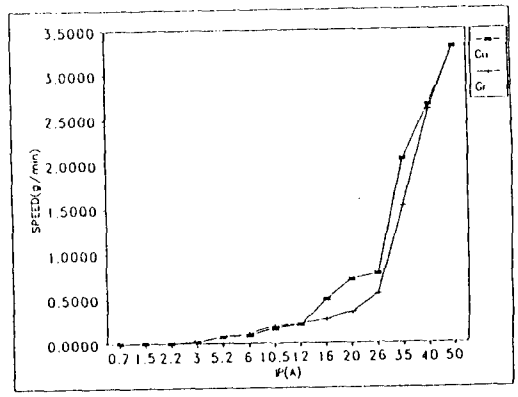

Fig 2 The relation of using CU , GR curent IP and working speed wear

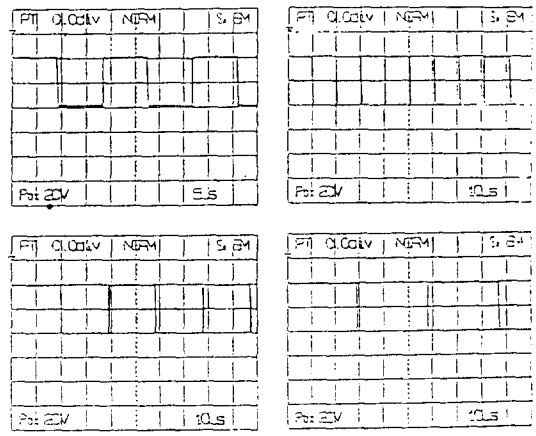

Fig 3 The discharge current by the pulse voltage applied

III-2 電流 變化에 따른 방전가공편의 표면조도 特性

Fig 5에서와 같이 전류의 값이 증가하면 표면조도의 거칠기는 거칠어짐을 알 수 있다. IP가 0.7 (A)일 때 전극 Cu는 5 μm Rmax이고 Graphite는 6μ이다. 그러나 IP가 1.5(A)일 때는 두 전극 모두 Rmax가 7μ로 나타나며 그 이후의 IP(A)의 값에 對한 표면조도는 거의 같은 기울기값 이나 Cu로 전극을 사용한 조건 보다 Graphite를 전극으로 사용한 조건이 표면조도의 결과가 조금이나마 양호해 짐을 알 수 있었다. IP가 3 (A)일 때는 전극 Graphite 사용시 보다 Cu의 표면조도가 더 양호하나 IP 12(A)이상 부터는 Cu로 전극을 사용 한 때 표면조도의 기울기 값이 커지는 것을 볼 수 있었으며 Graphite의 전극 사용이 더 양호한곳으로 나타나는데 이것은 Graphite의 특성이 가볍고 변형이 없으며, pulse 폭이 좁은 영역으로 가공할 경우 전극재료 그자체의 緻密性이 가공면에 영향을 주기때문이라고 사료된다. 35(A)까지는 Graphite의 전극 사용이, 40(A)부터는 Cu의 표면조도 거칠기가 양호한것으로 나타났고, 45(A)에서는 갑자기 Graphite가 거친것으로 나타났으며 50(A)에서는 같은 표면조도의 값이 나타났다. 이를 고찰하여 보면 Cu전극 사용시 IP 35(A)이하에서는 Ton의 값을 77 (μs)이하로 입력, 실험하였으나 그 이후 157 (μs) 이상으로 상승시켜 240 (μs)까지 실험하게 되었으며, Graphite를 전극으로 실험할 때에는 IP 30 (A) 이하에서는 Ton의 값을 20 (μs)이하로, 그 이상에서는 200~240(μs)으로 설정하여 실험한 결과로 이해 된다. 이것은 가공속도와의 관계에서와 같은 脈絡으로 볼 수 있는데 IP(A)의 값이 상승하면 가공속도가 빨라지나 표면조도의 Rmax값은 커진다. 즉 전류값이 커지면 가공속도는 빨라지면서 표면조도는 거칠어지며 이때에 pulse time Ton 과 Toff도 영향을 준다는 사실이다. 즉, 적정한 방전 가공법은 전류 IP값과 pulse time Ton, Toff를 같이 상승 시키거나 작은 값으로 조절하는데

Ton 값의 高, 低 폭에 가공속도와 표면조도의 거칠기 값도 비례한다는 사실을 알게 되었다.

이 표면조도를 pulse폭과 방전 전류 파고값의 函數로 표시하면 다음과 같다.

$$R_{max} = K_t \times T_{on}^{0.3} \times I_p^{0.4}$$

[R_{max} : 표면거칠기(μm)
K_t : 常數, 2.3(Cu^+ - St^-의 境遇)]

이상과 같이 표면 조도의 실험 결과를 KSB 0161과 비교하여 보면 IP 3(A)-Ton 10-Toff 10 이하일 때 표면 거칠기값이 6μm Rmax로 그 결과가 나타났으므로 표면거칠기 기호(▽▽▽), 정도 1.6S~6.3S에 해당되어 가공 흔적이 거의 남지 않는 극히 평활한 상다듬질 상태에 해당되고, IP 10(A)-Ton 20 - Toff 15 이하일 때 표면거칠기는 20μm Rmax로 기호(▽▽), 정도 12.5S ~ 25S에 해당되어 가공흔적이 남지 않을 정도의 보통다듬질 상태의 가공이 되며, IP 45(A)-Ton 240-Toff 20 이상일 때 그 결과는 105 μm Rmax로 기호(▽), 정도 35S~100S에 근접하는 가공흔적이 남을 정도의 거친 다듬질 상태임이 고찰되었다.

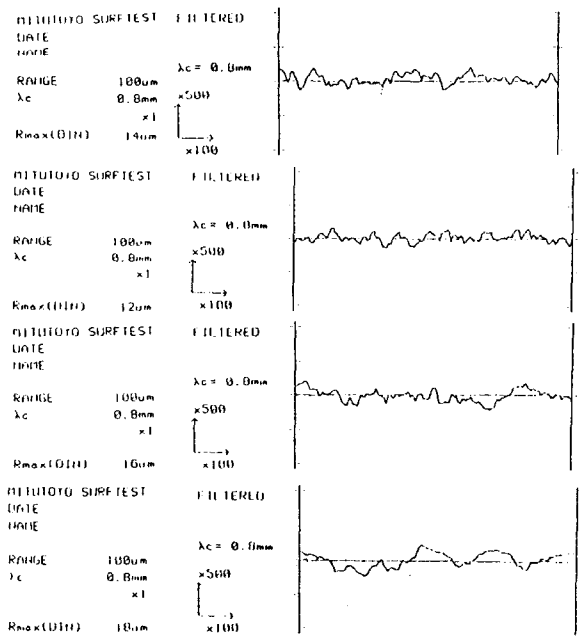

Fig 4 Out put of surface roughness measurement

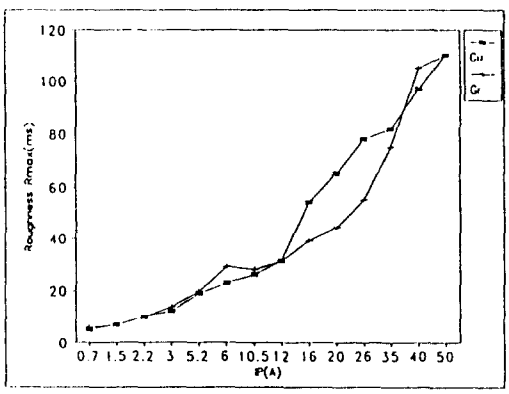

Fig 5 The relation of using CU^+ ,GR^- curent IP and roughness wear

III-3 電流 變化에 따른 電極消耗比의 特性

Fig 6에서 전류 IP(A)가 클수록 電極消耗比는 적은 것으로 나타났다.

IP 2.2(A)까지는 Graphite 전극의 소모비가 Cu에 비해 많은 것으로 나타났으나 IP 3(A) 이후 부터의 소모비는 Graphite가 Cu에 비해 급격히 감소되었으며, Cu가 크게 나타났고, 특히 IP 3 (A)까지는 Graphite의 변화가 급진적인 변화를 보이고 있으며, IP 5.2 (A)부터 上昇후 10 (A) 부터 다시 하향한 것을 알 수 있는데 이때에 Graphite의 전기적인 조건은 IP 3 (A)-Ton 20(μs)-Toff 20(μs), IP 5.2 (A)-Ton 20 (μs)-Toff 20 (μs), IP 6 (A)-Ton 30 (μs)-Toff 10 (μs), IP 10.5 (A) - Ton 20 (μs)-Toff 20 (μs)이다. IP 10.5 (A) 이후에서는 Cu의 전극 소모비가 적은 것으로 나타났다가 IP 30 (A)- Ton 200 (μs)-Toff 20 (μs)으로 실험을 한 결과 다시 Graphite의 전극 소모비가 급진적인 감소 변화를 보이고 있다. 이것으로 방전 가공속도 및 표면조도의 다듬질 상태와는 상반되게 전류의 값과 전극 소모량은 反比例 한다는 것을 이해할 수 있으며 가공속도나 표면조도와 같이 一律的인 기울기를 갖는 선으로 나타나지 않고 일부 변화가 있는 선으로 표시된 것을 볼 수 있다. 전극소모량은 방전액이 일 분해하여 생성된 탄화물(Graphite, Carbon 및 가공chip)이 混合된 것)이 電極面에 부착하여 이 탄화물과 시편사이에서 방전이 계속되기 때문이며, 이런 조건하에서는 전극(+극)의 방전집이 높고 전류밀도가 저하하여 (+)극 표면에 沈積物이 파손되지 않기 때문에 전극의 소모가 감소되는 것으로 판단 되어 전극의 소모비는 전기조건보다 기본적으로 전극재료의 조합으로 스스로 결정되는 熱傳導率, 比抵抗, 融點, 粘性 등의 전극 固有 物理的 性質과 放電間隙길이, 진도율, 가공액의 분해에 의한 탄소의 부착과 그 보호작용에 영향이 있다고 판단 되었다. 물론 양극 (+)과 음극(-)의 energy 분배 비율이 IP와 Ton에 의해 변화 되므로 전기적 조건을 무시할 수 없고 또한 영향을 받으며 곡선자체가 전류의 크기 증가에 따라 (-)기울기값을 갖는다고 判斷되여 진다. 즉 物理常數에 의해 결정되는 부분과 전류 IP 및 Ton, Toff의 변화에 복합적으로 基因한다고 판단 되어지며 전극 소모량은 Ton의 범위에 따라서 다음의 식으로 분류된다..

1) $T_{on} > K\ I_p^{2.6}$

이 범위는 지소모 領域으로 pulse폭이 증가함에 따라 단일 pulse전극 소모량이 감소되는 傾向을 나타내며 그 값은 다음과 같이 된다.

$$e_1 = K_{e1} \times T_{on}^{-0.7} \times I_p^{2.6}\ (g/pulse)$$

[K_{e1} : 상수, 3.3×10^{-10}(Cu^+ - St^-의 경우)
e_1 : 단일 pulse 전극소모량]

2) $T_{on} < K\ I_p^{2.6}$

이 범위는 pulse폭이 증가함에 따라 단일 pulse 전극 소모량이 증가되는 경향을 나타내며 그 값은 다음과 같이 된다.

$$e_2 = K_{e2} \times T_{on} \times I_p^{1.2}\ (g/pulse)$$

[K_{e2} : 상수, 9×10^{-12}(Cu^+ - St^-의 경우)
e_2 : 단일 pulse 전극소모량(g/pulse)]

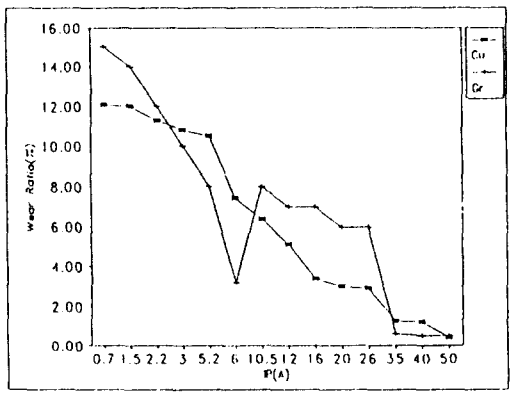

Fig 6 The relation of using CU^+ ,GR^- curent IP and electrode wear ratio

Ⅳ. 結論

本 硏究에서는 SM種類의 재료를 Cu와 Graphite의 두종류 전극을 사용하여 전류에 변화를 주어 실험하였으며, 그 결과 방전속도, 표면조도, 전극소모비의 特性을 分析한 전류량에 따른 最適방전조건은 다음과 같다.

1. 電流의 入力値를 높이면 分當 放電量이 많아져 加工速度를 빨리할 수 있으며, 表面粗度 또한 粗度값 (μm) Rmax이 증가 되며 IP가 20 (A) 이상일 경우 방전이 不安定한 것으로 나타났다.

2. KS규정에 따른 표면거칠기는 IP 3(A)까지는 표면거칠기 기호(▽▽▽), 정도 1.6S~6.3S에 해당되어 극히 평활한 상다듬질 상태, IP 10(A)이하일 때 표면거칠기 기호 (▽▽), 정도 12.5S~25S에 해당되어 보통다듬질 상태이며, IP 45 (A) 이상일 때 그 결과는 105 μm Rmax로 기호 (▽), 정도 35S~100S에 근접하여 거친 다듬질 상태임이 비교 되었다.

3. 전극의 소모는 전기조건의 직접적인 영향을 받지 않으며 전극재료의 물리적 요소에 의해 설정되는 것으로 이해되나 전압과의 관계는 간접적인 영향을 받게되며 전류가 커짐에 따라 전극은 저소모량이 된다.

參 考 文 獻

1. 國技正典 : 放電加工における放電点分布の觀察 : JSPE Vol.57 (1991) p9~11
2. 鹽田泰仁 : 放電加工ワイアカット : 日刊共業新聞社 (1990) p2~14
3. 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 (1991) p66~171
4. 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 (1992) p18~25
5. 木下夏夫 : 放電加工の硏究開發技術動向 : JSPE Vol.157, No.6 (1991) p5~7
6. K. P. Rajukar and W.M. Wang : A New Model Reference Adaptive Control of EDM : CIRP,Vol.38.,No.1 (1989) p183~186
7. T. Masuzawa : Drilling of Deep Microholes by EDM : CIRP Vol.38,No1,(1989) p195~198
8. D.Kremer : Effects of Ultrasonic Vibrations on the Performances in EDM : CIRP Vol.38,No1,(1989) p199~202
9. 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 (1967) p379~385
10. 木本康雄,田官勝恒,田畑英彦 : 超硬質合金放電加工の電極消耗放電加工の硏究 : 日本造船技報Vol.35,No.1 (1975) p1~7
11. C. J. Heuvelman : Study on the flushing in EDM : JSPE, Vol.51,No.7 (1985) p112~117
12. Thomas I. Drozda, Charles Wick : Tool and Manufacturing Engineers Hndbook (volumel-Machining) : Socirty of Manufacturing Engineers One SME Drive, No.14 (1988) p42~63
13. 柳濟九 : 放電加工 : 大光書林 (1988) p12~65
14. 김창호 : 방전가공 : 機電硏究社 (1992) p47~98
15. KS D 3752 (1991)