

3차원 방전가공에서 전류밀도를 고려한 방전가공조건 결정

이 건 범*, 김 정 두**, 최 병 훈*, 송 희 덕*

Determination of Machining Parameters Considering Current Density in Three Dimensional Electrical Discharge Machining

Keon-Beom Lee*, Jeong-Du Kim**, Byung-Hun Choi*, Hee-Duck Song*

Abstract

Owing to the complexity of electrical discharge machining (EDM) phenomenon, it is very difficult to determine optimal machining parameters for improving machining performance. This paper proposes a methodology for determining optimal electrical discharge machining parameters, which is maintaining suitable current density for increasing productivity or improving surface roughness.

Machining area is closely related on optimal machining parameters in electrical discharge machining process, so calculation of machining area is needed in order to determine optimal machining parameters. In this study machining area, which is corresponding to the machining position, is calculated from intersection curves between the tool surface and a horizontal plane.

Keywords: EDM (electrical discharge machining), Current density, machining parameter

1. 서론

방전가공은 동, 그래파이트 등과 같이 가공성이 좋은 도전성 재료를 공구전극으로 사용하여 강, 초경합금등과 같이 기계적 성질이 우수한 소재를 가공하는데 널리 사용되고 있는 특수 가공법이다. 방전가공은 공구전극과 가공물사이에 경유나 탈 이온수 등과 같은 유전체를 개재시켜

절연을 유지한 상태에서 펄스온타입동안 공구전극과 가공물사이에 60~300V정도의 펄스전압을 인가하고, 극간거리를 절연이 파괴될 수 있는 임계거리까지 접근시키면, 극간의 절연이 파괴되어 불꽃형태의 전류가 급격히 흐르게 된다. 전류가 흐르는 부위(전극, 가공물)는 불꽃방전에 의해 고온이 되어 용융, 기화되어 폭발하게 되는데, 폭발력에 의해 기화된 부분이 비산된다. 일정시간의 펄스온타입

* 홍성기능대학 전산응용기계과

** KAIST 기계공학과

이 경과하면, 극간의 절연상태를 회복할 수 있도록 일정 시간동안 전류를 차단하는 휴지시간이 필요하다. 휴지시간 동안 방전열에 의해 용융 분산된 부분이 냉각, 응고되므로 비산된 형상으로 용융부에 미소한 방전흔이 생성된다. 이러한 과정을 연속적으로 반복하면 공구전극과 동일한 형상의 제품을 가공할 수 있다.

방전가공은 소재의 기계적 성질에 관계없이 도전성 물질은 모두 가공이 가능하므로 기계적 성질이 우수한 신소재를 많이 사용하고 있는 금형가공에 적합하다. 그러나 방전가공은 절삭가공에 비하여 가공속도가 느리므로 산업현장에서는 가공시간을 단축하기 위하여 정삭여유를 남기고 절삭가공으로 예비가공 한 후 나머지 부분을 방전가공하는 경우가 대부분이다. 그러나, 현재의 방전가공기는 전원 공급장치의 발달로 고전류를 이용한 고속 방전가공이 가능하므로 절삭가공으로 예비가공 하지 않고 몰드베이스를 직접 방전가공하고 있는 추세이다⁽¹⁾.

3차원 형상의 방전가공은 방전가공 위치에 따라 방전면적이 변하므로 방전면적에 적응적인 방전가공조건을 결정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 현재까지 방전면적에 적응적인 방전가공조건을 결정하기 위한 연구는 와이어 방전가공에서 신경망을 이용하여 가공물 두께에 적절한 가공조건을 결정하기 위한 연구^(1,2)가 있었으며, 형조방전가공에서는 방전면적에 기초하여 2차원 방전가공조건을 결정할 수 있는 방법⁽³⁾이 연구된바 있다. 그러나 현재까지 방전면적이 방전가공 위치에 따라 변하는 3차원 방전가공에서 최적 방전가공조건을 결정하는 연구는 수행된 바 없다.

본 연구는 3차원 방전가공에서 방전면적에 적응적인 방전가공조건을 결정하기 위하여 공구전극의 기하학적 형상을 모델링한 곡면식과 방전가공 위치에 상당하는 평면과의 교선을 구하여 이를 기초로 방전면적을 계산하고, 계산된 방전면적에 적응적인 방전가공조건을 결정하기 위한 것이다.

2. 방전가공 이론

방전가공은 극간의 거리가 가까운 곳에서 불꽃방전이 시작하여 과도 아크방전에 의하여 가공되는 방법으로 방전발생에 의해 가공물이 제거되는 원리는 다음과 같다.

- (1) 아크발생 : 극간의 거리가 5~50 μ m 정도로 가까워지면 절연이 파괴되어 가는 아크기둥을 통하여 전류밀도가 극히 높은 전자가 흐르기 시작한다. 극간의 전계강도가 절연을 파괴할 수 있는 10⁶ (V/cm)가 되면 음

극으로부터 전자가 방출되어 아크방전이 발생한다.

- (2) 열 발생 : 아크기둥의 온도는 정상상태에서 5000~6000K이고 과도상태에서는 10000K에 이르게 되는데, 아크기둥이 시작되는 부분의 온도는 모든 재료의 비등점 이상이 된다.
- (3) 기화폭발 : 가공액이 급격히 기화팽창 되므로 용융부는 수백기압에 달하는 고압이 된다.
- (4) 용융부분의 비산 : 용융된 부분은 작고 둥근 형상으로 가공액 중에 비산된다. 마지막에 비산된 부분은 비산될 당시의 형태로 전극면에 잔류하게 되는데, 이곳이 다음 방전을 유발하는 방전점이 된다.
- (5) 절연회복 (탈이온) : 용융금속이 기산된 후 주변으로부터 가공액이 유입되어 절연이 회복된다.

이와 같은 과정을 빠른 속도(1~수kHz)로 반복하면 가공물에 방전흔적이 누적되어 가공물이 XY평면에 대해 전극형상과 대칭형상으로 가공된다. 연속적으로 방전가공을 하기 위해서는 극간거리가 방전을 발생시킬 수 있는 거리를 일정하게 유지하여야 하므로 가공이 진행되어 극간거리가 멀어지게 되면 서보기구는 공구전극을 가공물 쪽으로 이동시켜 항상 일정한 간격을 유지할 수 있도록 한다.

Fig.1은 표준압력하의 대기에서 전극을 가공물쪽으로 접근시켜 절연이 파괴되어 방전이 발생할 때의 전압과 전류의 특성을 나타낸 곡선이다. 공구전극과 가공물사이를 가스로 채우고 두 전극사이에 전압을 인가하면, 전위의 영향에 의해 가스내의 자유이온이 이동하여 절연체인 가스에 전도성이 부여되어 미소전류가 흐르게 된다(0-a구간). 점차로 전압을 증가시키면 인가된 전압에 비례하여 전류가 증가하는데, 이런 상태에서 전압을 계속 증가시키면 전계강도에 의해 이동된 캐리어(이온, 전자)의 수가 전극에서 발생할 수 있는 최대 캐리어의 수와 같게 되어 전류는 포화상태가 된다(a-b구간). 전압을 점차 증가시켜 임계값에 도달하게 되면(b-c구간) 전계에 의해 가속된 전자가 중성입자와 충돌하여 부가적으로 전자와 양이온이 생성되어, 전자의 수가 급격히 증가하는 전자사태가 유발되어 도전로가 형성되므로 절연이 파괴되어 약10⁻⁴sec정도의 매우 짧은 시간동안 자발적인 불꽃방전이 발생한다. 이 영역에서는 전압이 감소하고 전류는 증가하게 된다(c-d구간). 방전가공은 이러한 불꽃방전이 발생할 때 생성되는 열을 이용한 것이다.

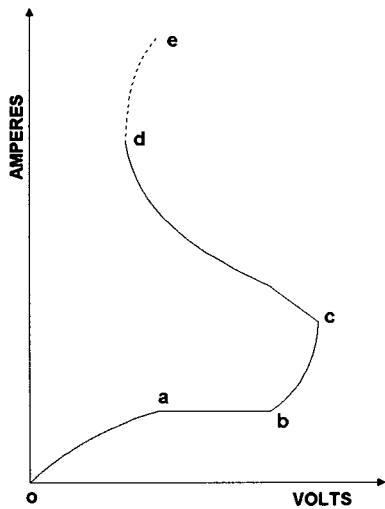


Fig.1 Volt-current curve in atmosphere

2.1 방전펄스와 에너지

Fig.2와 같이 극간에 가해진 피크전류치를 $I_p(A)$, 펄스온타임을 $\tau_p(sec)$, 휴지시간을 $\tau_r(sec)$, 방전전압을 $e_g(V)$ 라 하면 단발방전에너지 $P_{single}(w)$ 는 식(1)과 같고 방전주파수 $f(Hz)$ 는 식(2)와 같다.

$$P_{single} = e_g \cdot I_p \cdot \tau_p \tag{1}$$

$$f = (\tau_p + \tau_r)^{-1} \tag{2}$$

식(1)과 식(2)로부터 가공중 연속방전 에너지 $P_{continue}(w)$ 는 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{continue} &= e_g \cdot I_p \cdot \tau_p \cdot f \\ &= e_g \cdot I_p \cdot \tau_p \cdot (\tau_p + \tau_r)^{-1} \\ &= e_g \cdot I \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $I = I_p \cdot \tau_p \cdot (\tau_p + \tau_r)^{-1}$ 로 평균가공전류(A)이며, $e_g(V)$ 는 방전전압으로 방전이 진행되는 동안 일정하다. 따라서 극간에 소비되는 연속 방전에너지 $P_{continue}$ 는

극간에 사용되는 전압에 관계없이 평균 가공전류에 의해 결정된다. 또한, 가공속도는 일반적으로 방전에너지에 비례하므로, 결국 가공속도와 가장 밀접한 관련이 있는 방전가공인자는 평균가공전류(I)라고 할 수 있다.

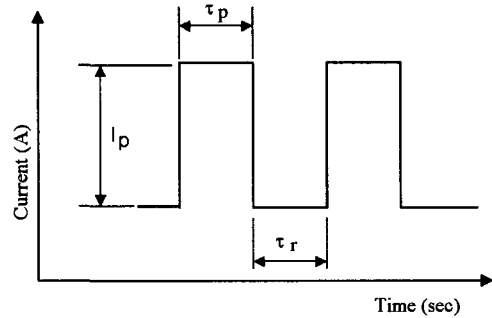


Fig.2 Current pulse type

2.2 방전가공인자의 영향

방전가공에 영향을 미치는 인자는 매우 많으나 2.1절에서 기술한 바와 같이 방전가공 성능과 밀접하게 관련이 있는 인자는 피크전류치 I_p , 펄스온타임 τ_p , 휴지시간 τ_r 이며 이들의 영향을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 피크전류치 (I_p) : 전극과 가공물간에 흐르는 피크전류의 크기로 전극소모율, 가공속도, 가공면거칠기, 오버컷 등에 가장 큰 영향을 미치는 방전가공 인자 중의 하나이다.
- (2) 펄스온타임 (τ_p) : 두 전극간에 전압이 인가되는 시간으로 전극소모율, 가공속도 등과 밀접한 관계에 있는 방전가공 인자로 특히 전극 소모율과 밀접한 관계가 있다.
- (3) 휴지시간 또는 펄스오프타임 (τ_r) : 두 전극간에 전압이 인가되지 않는 시간이다. 이 기간동안 절연이 회복되어 연속적으로 방전가공이 가능하다. 가공안정성과 밀접한 관계가 있는 가공 인자이다.

3. Hybrid SSI 알고리즘

컴퓨터를 이용하여 복잡한 곡면을 표현할 때 곡면간의 교선을 구하는 것은 가장 기본적이고 중요한 문제중의 하나이다.

곡면모델링에서 교선을 구하는 방법으로는 대수학적방

법, 격자탐색법, 트레이싱법(Tracing), 서브디비전(Sub-division)방법 등이 있으며, 자유곡면 들간의 교선을 구하는 방법으로는 트레이싱법(Tracing)과 서브디비전(Subdivision)방법이 자주 이용되고 있다^[5].

Barnhill^[6], Timmer^[7]등에 의하여 제안된 트레이싱(Tracing) 방법은 수행속도는 빠르지만 곡면을 다면체로 근사하여 처리하므로 일부 교선을 탐지하지 못하는 문제점이 있으며, 서브디비전(Subdivision)방법은 분할된 곡면을 둘러싼 최대최소박스를 이용하여 두 곡면의 교차여부를 판별하므로 모든 교선을 찾을 수 있다는 장점이 있으나 수행속도가 느리고 얻어진 교선이 매끄럽지 못하다는 단점이 있다^[5].

본 논문에서는 자유곡면간의 교선을 빠르고 정확하게 구하기 위하여 트레이싱(Tracing)방법과 서브디비전(Subdivision)방법이 혼합된 하이브리드(Hybrid)방법^[5]을 이용하였다. 하이브리드(Hybrid) 알고리즘은 입력된 두 곡면에 대하여 교선 상에 존재하는 일련의 점들을 여러 개의 서브패치(subpatch)로 분할하는 서브디비전(Subdivision)단계, 교차 가능한 서브패치(subpatch)쌍으로부터 하나의 교점을 찾는 탐지단계, 두 곡면에 대하여 교선 상의 한 점이 얻어지면 이웃한 교점을 결정하기 위한 추적단계의 3단계를 거쳐 구한다^[5].

Fig.3은 Hybrid SSI알고리즘을 이용하여 방전가공 위치에 상당하는 평면과 공구전극을 모델링한 곡면과의 교선 커브를 방전가공위치에 따라 나타낸 것이다.

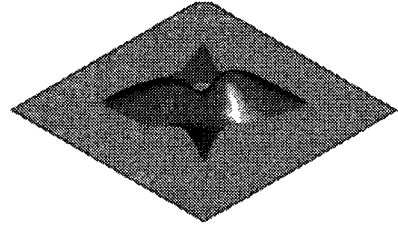
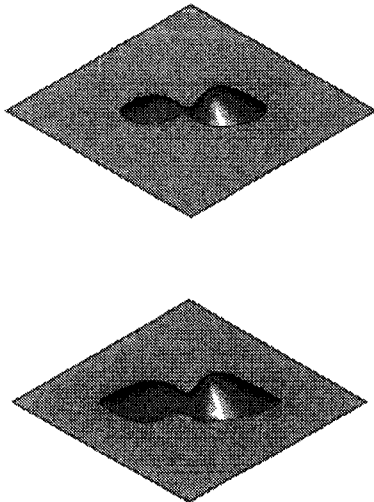


Fig.3 Intersection curves between surface and plane

4. 방전가공면적 계산 방법

평균 가공전류밀도는 방전가공 위치에 대한 공구전극의 투영면적으로 결정된다^[1].

Fig.4는 방전가공 위치에 따라 방전가공이 이루어지는 공구전극의 단면형상을 나타낸 것이다.

3차원 방전가공은 Fig.4와 같이 방전가공 위치에 따라 방전면적이 다르므로 평균 가공전류를 일정하게 유지할 수 있는 방전가공조건을 결정하기 위해서는 방전가공 위치에 대한 방전가공면적이 계산되어야 한다.

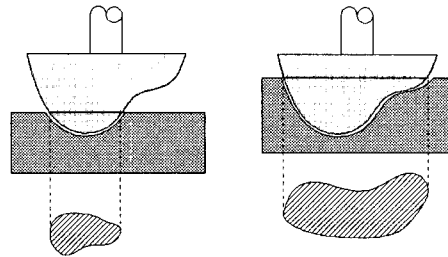


Fig.4 Projected discharge area to a tool discharge position

본 논문에서는 제3절에서 제시된 하이브리드(hybrid) 알고리즘을 이용하여 모델링 된 공구전극의 형상정보와 방전가공깊이에 상당하는 XY평면과의 교선을 구하고, 교선으로부터 방전면적을 계산하는 방법을 제시하였다.

하이브리드(hybrid) 알고리즘에 의해 생성된 교선커브(intersection curve)로부터 방전가공면적을 구하기 위하여 Fig.5와 같이 교선커브의 최대 y값인 T_y 와 최소y값인 B_y 의 범위에서 T_y 에서부터 스캐닝 간격(Scanning interval) d 씩 감소시켜 최소 Y값인 B_y 에 도달할 때까지

X축에 평행한 탐색선(Scan-line)과 교선커브와의 교점을 구한다.

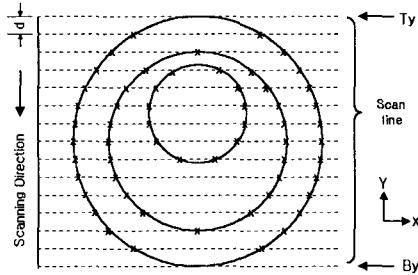


Fig.5 Intersection Points between curves and scan-lines

탐색선(Scan-line)과 교선커브와의 교점이 계산되면 탐색선(Scan-line) 위치에 대한 일련의 교점들을 차례로 저장한다. 탐색선(Scan-line)이 교선으로 이루어진 폐다각형과 접할 때, 접점은 교선다각형의 꼭지점에서 발생하게 되며, 이 경우 2개의 교점이 존재하는 것으로 정한다.

Fig.6과 같이 교선 다각형의 연속한 세 꼭지점을 P₁, P₂, P₃라고 하자. 여기서 가운데 점 P₂를 판정교점이라고 할 때 탐색선(Scan-line)은 P₂를 지나게 된다. 탐색선(Scan-line)의 단위 방향벡터를 u라고 하자. 이때 판정교점이 Fig.6(a)와 같이 접점인 경우 식(4)를 만족하게 된다.

$$(u \times a)|_z \cdot (u \times b)|_z > 0 \quad (4)$$

혹은, $(u_1 a_2 - u_2 a_1) \cdot (u_1 b_2 - u_2 b_1) > 0$

여기서 $a = (a_1, a_2, a_3) = P_1 - P_2$

$b = (b_1, b_2, b_3) = P_3 - P_2$

$c|_z$: 벡터 c의 z성분

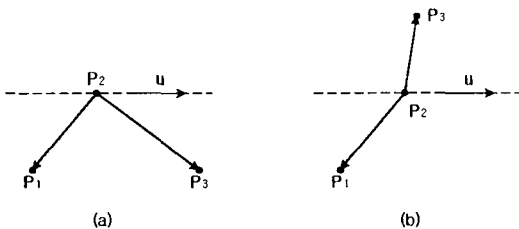


Fig.6. Discrimination of tangential point

Fig.7에서와 같이 각 탐색(Scan) 위치에 대한 일련의 교점들 중에서 홀수번째와 짝수번째의 교점을 연결한 직선에 상당하는 영역이 임의의 방전위치에서 방전면적의 일부이므로, Fig.7에 도시된 방전가공길이 L_i와 탐색간격 d를 곱한 값을 총합하면 식(5)와 같이 임의의 방전가공 위치에서의 방전가공 면적이 된다.

$$S = d \sum_{i=0}^n L_i \quad (5)$$

여기서 S는 임의의 방전가공 위치에서의 방전면적이고, L_i는 i번째 탐색 위치에서의 방전가공이 발생하는 부분의 길이이다.

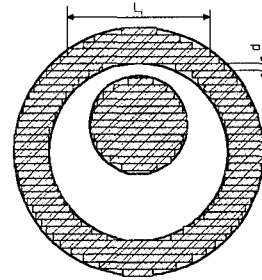


Fig.7 Area calculation by proposed scan-line method

5. 방전가공조건 결정

제안된 방전면적 계산방법에 의하여 방전면적이 계산되면, Fig.8과 같은 절차에 의하여 방전면적을 기초로 평균 가공전류밀도를 일정하게 유지할 수 있는 방전가공조건을 결정할 수 있다.

최적 방전가공조건은 전극과 가공물의 재질에 적합한 평균 가공전류밀도(J_m)를 일정하게 유지할 수 있도록 결정된 전기적 조건을 말한다. 방전가공에 적합한 평균가공전류밀도는 전극이 황동일 경우 10~13 A/cm², 그래파이트일 경우는 5~7 A/cm² 정도까지 가능하나, 일반적으로 평균 가공전류밀도가 5A/cm² 정도일 때 가장 효율이 좋다고 알려져 있으므로^[1,8,9] 본 연구에서는 평균 가공전류밀도가 5A/cm²가 될 수 있도록 방전가공조건을 결정하였다.

평균 가공전류밀도는 단위면적 당 평균 가공전류의 크기로 피크전류치 I_p와 펄스 온타입 τ_p에 의해 결정된다.

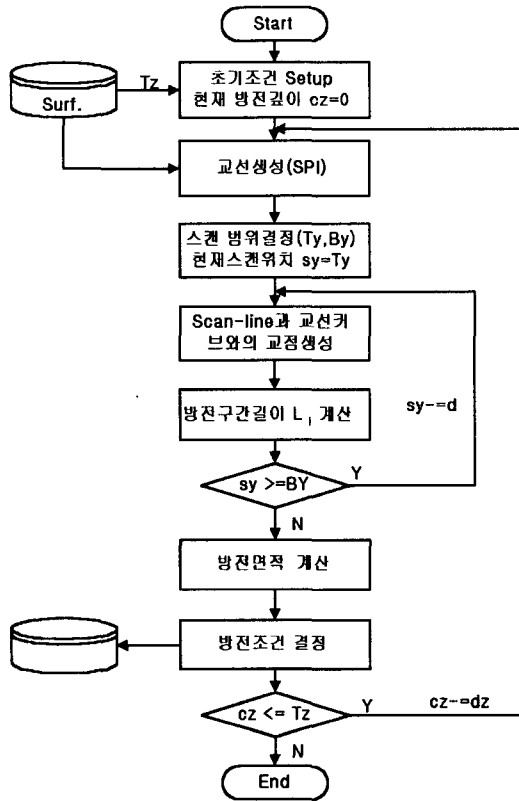


Fig.8 Procedure for determination of EDM parameters based on EDM area

식(6)은 단발방전에 대한 전류밀도를 나타낸 것으로 실제 방전가공에서는 평균 가공전류밀도(J_m)가 일정하도록 방전조건이 결정되어야한다^(1,4).

$$J_m = \frac{\tau_p \cdot I_p}{S(\tau_p + \tau_r + \tau_w)} = \frac{I_p \cdot D}{S} (A/cm^2) \quad (6)$$

$$D = \frac{\tau_p}{(\tau_p + \tau_r + \tau_w)} \quad (7)$$

- τ_p : 펄스 온타임 (μs)
- τ_r : 휴지시간 (μs)
- τ_w : 지연시간 (μs)
- S : 방전가공 면적 (cm^2)

I_p : 피크전류 (A)

D : duty factor

여기서 지연시간 τ_w 는 펄스온타임 τ_p 와 휴지시간 τ_r 에 비하여 매우 작은 값이므로 식(7)로 표기된 duty factor를 식(8)과 같이 단순화시킬 수 있다^(1,4)

$$D = \frac{\tau_p}{(\tau_p + \tau_r)} \quad (8)$$

본 연구에서는 전극과 가공물의 재질에 적합한 평균 가공전류밀도를 유지할 수 있도록 방전면적에 기초하여 피크전류치(I_p), 펄스온타임(τ_p), 휴지시간(τ_r)을 결정하였다.

피크전류치 I_p 는 식(6)으로부터 식(9)와 같이 유도될 수 있으며, 주어진 공구의 높이에 따라 방전면적을 계산한 다음 평균 가공전류밀도 J_m 와 duty factor를 일정한 값으로 고정하면 방전면적에 적절한 피크전류치 I_p 를 결정할 수 있다.

$$I_p = \frac{S \cdot J_m}{D} \quad (9)$$

피크전류치 I_p 가 결정되면 펄스온타임 τ_p 와 휴지시간 τ_r 을 결정해야 하는데, 연구⁽¹⁾에 의하면 전극소모비는 피크전류치 I_p 와 펄스온타임 τ_p 에 따라 식(10)과 같이 결정된다.

$$\varepsilon = \frac{1.5 I_p^{1.74}}{\tau_p^{1.35}} \quad (10)$$

따라서 전극소모비를 방전가공 용도에 적절한 값으로 고정하면 식(11)과 같이 펄스온타임 τ_p 를 구할 수 있다.

$$\tau_p = \left(\frac{1.5 \cdot I_p^{1.74}}{\varepsilon} \right)^{1/1.35} \quad (11)$$

식(11)로부터 펄스온타임 τ_p 가 결정되면 식(8)의 duty factor 식으로부터 식(12)와 같이 절연회복을 위해 필요한 휴지시간 τ_r 을 결정할 수 있다.

$$\tau_r = \frac{(1-D)}{D} \tau_p \quad (12)$$

여기서 duty factor는 방전가공속도와 밀접한 관계가 있다. 방전가공속도를 증가 시키기 위해서는 duty factor를 크게 해야 하지만, duty factor가 너무 크면 절연회복이 되기 전에 전압이 재 인가되므로 방전가공이 되지 않거나 방전가공이 매우 불안정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 안정된 방전가공 범위내에서 방전가공 속도를 높일 수 있도록 duty factor를 적절한 값으로 고정시키고 평균 가공전류밀도가 $5A/cm^2$ 를 유지할 수 있도록 주요 방전가공조건을 결정하였다.

6. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 방전가공 위치에 따라 방전면적이 변하는 3차원 방전가공에서 방전면적에 적절한 방전가공조건을 결정할 수 있는 방법을 제한한 것으로 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

- (1) 전극의 곡면식으로부터 방전가공면적을 계산하므로 방전가공위치에 대한 정확한 방전면적을 계산할 수 있다.
- (2) 방전면적을 기초로 가공조건이 결정되므로 작업자의 경험에 의존하던 기존의 방식을 탈피하여 단순 작업자도 쉽게 가공할 수 있다.
- (3) CAD데이터로부터 방전가공조건을 자동적으로 결정할 수 있으므로 생산자동화가 가능하다.

이상과 같이 제안된 방법에 의하여 피크전류치, 펄스온 타임, 휴지시간과 같은 중요한 전기적 조건은 모두 결정할 수 있으나, 본 연구에서는 서보기구의 점프조건, 가공액 분사압력, 가공액의 농도 등과 같은 비 전기적인 조건은 배제되었다. 향후, 보다 효율적인 방전가공조건을 결정하기 위해서는 본 연구에서 제외된 비 전기적인 조건을 최적화하기 위한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 이건범, 최적 방전가공조건 결정에 관한 연구, 울산대학교 박사학위논문, 1998
2. 이건범, 주상윤, 왕지남, 2단계 신경망 추정에 의한 와이어 컷 방전가공조건 선정, IE interfaces, Vol.10, No.3, pp.125-132, 1997
3. 이건범, 주상윤, 왕지남, 와이어 가공조건 자동생성 2단계 신경망 추정, 한국정밀공학회, Vol.15, No.2, pp.7-13, 1998
4. 이건범, 주상윤, 왕지남, 신경망을 이용한 2차원 방전가공조건 선정, IE interfaces, Vol.11, No.1, pp.145-153, 1998
5. 주상윤, 이상현, 곡면간의 교선에서 Step size 결정 및 점접 탐지방법, 한국 CAD/CAM학회, Vol.3, No2, pp.121-126, 1998
6. R. E. Barnhill, F. Farin, M.Jordan, B.R. Piper, Surface Surface Intersection, CAGD, Vol.4, pp.3-16, 1987
7. H. G. Timmer, Analytic Background for Computation of Surface Intersection, Douglas Aircraft Component Technical Memorandum, C1-250-CAT-76-044, April, 1977
8. 三菱電機(株), 放電加工のしくみと100%活用法, 技術評論社, 昭和60年 齊藤長男, 毛利尙武, 高鷲民生, 高谷政典, 放電加工技術,