

## 공구전극곡면에 의한 3 차원 방전가공조건의 결정

주상윤\*, 이건범\*\*

### Determination of Parameters for 3-Dimensional Electrical Discharge Machining by a Tool Electrode Surface

Sang-Yoon Ju\*, Keon-Beom Lee\*\*

#### ABSTRACT

This paper presents a method for determining machining parameters in 3-dimensional electrical discharge machining(EDM). The parameters are the peak value of currents, the pulse-on time, and the pulse-off time. It is known that they influence the performance of EDM more than the other else. The parameters are determined from the discharge area between a tool electrode and a work piece. The discharge area is directly influenced by the geometry of a tool surface and the tool discharge position. The discharge area on a tool discharge position is calculated from intersection curves between the tool surface and a horizontal plane. The grid search method is applied to determine the intersection curves. An example is introduced to show that the machining parameters are obtained from the surface geometry of a tool electrode.

**Key Words** : EDM(Electrical Discharge Machining), Tool Electrode Surface(공구전극곡면), Discharge Area(방전면적)

#### 1. 서론

방전가공은 방전이 발생할 수 있는 상태를 인위적으로 설정하여 방전에 의해 생성되는 열 에너지를 이용한 전기적 가공법이다. 따라서, 방전가공은 전극과 가공물이 전도체이지만 하면 가공물의 기계적 성질에 관계없이 가공이 가능하므로 기계적 성질이 우수한 소재를 가공하는 금형가공분야에서 널리 이용되고 있다. 그러나, 방전가공은 절삭가공에 비하여 가공속도가 느리므로 가공물을 절삭가공으로 예비가공한 후, 방전가공으로 마무리 가공하는 것이 일반적인 방법이였으나, 최근에는 고성능 방전가공기의 출현으로 고속가공이 가능하므로 절삭가공에 의한 예비가공 없이 가공물

을 직접 방전가공하는 경우가 점차 많아지고 있다. 이와 같이 예비가공 없이 가공물을 직접 방전가공할 경우 가공성은 설정된 방전가공조건에 의해 결정되는데, 방전가공에서 가공성을 향상시킬 수 있는 적절한 방전가공조건을 결정하기 위해서는 방전현상을 정확하게 모델링할 수 있어야 한다. 그러나 현재까지 방전현상을 정확하게 모델링 할 수 있는 방법이 없으므로 산업현장에서는 작업자의 경험에 의존하여 방전가공조건을 결정하고 있다. 따라서, 방전가공에서 생산성을 향상시키기 위해서는 체계적으로 방전가공조건을 결정할 수 있는 방법이 필요하다.

현재까지 체계적으로 방전가공조건을 결정하기 위한 연구는 와이어 방전가공에서 신경망을 이

\* 울산대학교 산업공학과

\*\* 홍성기능대학 전산응용기계과

용하여 가공물 두께에 적절한 가공조건을 결정하기 위한 연구<sup>[1,2]</sup>가 있었으며, 형조방전가공에서는 방전면적에 기초하여 2 차원 방전가공조건을 결정하기 위한 연구<sup>[3]</sup>가 있었으나, 현재까지 방전면적의 변화가 많은 3 차원 방전가공에서 체계적인 방전가공조건을 결정하기 위한 연구는 없었다.

본 연구는 3 차원 방전에서 적절한 방전가공조건을 결정하기 위하여 공구전극의 형상을 모델링한 곡면식과 방전가공 위치에 상응하는 평면과의 교선 커브로부터 방전면적을 계산하여 체계적으로 방전가공조건을 결정할 수 있는 방법을 제안한 것이다.

## 2. 수평면과 자유곡면의 교선 생성

곡면모델링에서 두 곡면 간의 교선을 구하는 방법으로는 대수학적 방법, 그리드탐색법, tracing 법, subdivision 방법 등이 있으며 이들 가운데 그리드탐색법은 일정한 높이를 가진 수평면과 자유곡면 간의 교선을 찾는 데 적합한 방법으로 알려져 있다<sup>[4]</sup>.

그리드탐색법에 의하여 자유곡면  $r(u,v) = (x(u,v), y(u,v), z(u,v))$ 와 수평면  $z = h$  간의 교선을 구하는 과정을 간단히 소개하기로 하자.

우선 곡면  $r(u,v)$ 의 parameter domain 에서 사각 그리드를 형성한다.  $(u_i, v_j)$ 를 그리드점이라고 할 때 임의의 그리드셀은 Fig.1 과 같이 4 개의 그리드점  $(u_i, v_j), (u_{i+1}, v_j), (u_i, v_{j+1}), (u_{i+1}, v_{j+1})$ 로부터 정의된다. 다음으로 수평면과 곡면과의 교선이 그리드셀을 통과하는지 여부를 조사한다. 만약 교선이 두점  $(u_i, v_j), (u_{i+1}, v_j)$ 을 양끝점으로 하는 모서리를 지나는 경우 다음의 식(1)을 만족하게 된다.

$$[z(u_i, v_j) - h][z(u_{i+1}, v_j) - h] < 0 \quad (1)$$

여기서  $z(u,v)$ 는 그리드점  $r(u,v)$ 의 z 성분값이다.

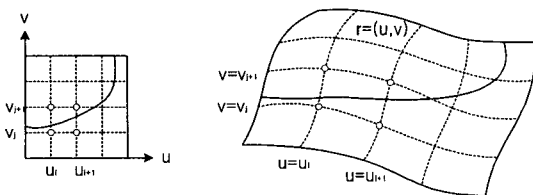


Fig. 1 The grid evaluation method

그리드의 모서리 상에 존재하는 교점은 수치적인 방법에 의하여 쉽게 구할 수 있다<sup>[4]</sup>. 일단 교선이 그리드셀을 통과하는 경우 한 그리드셀에 속한 모서리와 교점은 두개가 존재한다. 따라서 식(1)과 수치적 방법을 이용하여 그리드셀의 다른 모서리에 속한 교점을 쉽게 찾을 수 있다.

이상과 같이 하나의 그리드셀에서 교선의 진입점과 퇴거점이 함께 존재한다. 또한 얻어진 퇴거점은 이웃한 그리드셀의 진입점이 되므로 연속적으로 이웃한 그리드셀을 찾아 교점들을 구할 수 있다. 이러한 과정은 다음과 같은 중단조건에 도달할 때까지 계속한다.

- 처음 출발점에 돌아왔을 때
- 자유곡면의 경계선에 도달했을 때

교선은 다수개 존재할 수 있으므로 하나의 교선을 발견한 다음에는 나머지 그리드셀에 대하여 동일한 방법을 적용하여 나머지 다른 교선들을 찾는다.

Fig.2 는 그리드탐색법을 이용하여 자유곡면과 여러 수평면과의 교선을 도시한 것이다.

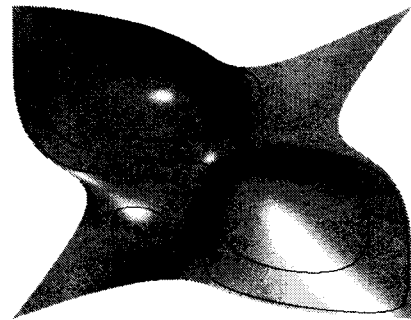


Fig. 2 Intersection curves between a surface and horizontal planes

## 3. 방전가공 위치에 대한 방전면적 계산

방전가공에서 가공속도를 빠르게 하기 위해서는 전극이 손상되지 않는 범위 내에서 최대의 방전 에너지를 발생시킬 수 있도록 전기조건을 결정해야 한다. 이러한 전기조건 결정은 평균 가공전류밀도( $J_m$ )를 기준으로 결정하는데, 전극이 손상되지 않는 적절한 평균 가공전류밀도는 전극 재질이 황동일 경우는 10~13 A/cm<sup>2</sup>, 그래파이트일 경우

는 5~7 A/cm<sup>2</sup> 정도로 전극의 재질에 따라 다르나 안정적인 가공이 가능한 최적 평균 가공전류밀도( $J_m$ )는 5 A/cm<sup>2</sup>로 알려져 있다<sup>15,6,7</sup>.

전류밀도는 단위면적 당 평균 가공전류의 크기로 피크전류치  $I_p$ 와 펄스온타임  $\tau_p$ 에 의해 결정되는데 식(2)는 단발방전에 대한 전류밀도를 나타낸 것이다.

실제 방전가공에서 방전가공면적의 변화에 적응적인 가공을 위해서는 식(2)의 평균 가공전류밀도( $J_m$ )가 일정하도록 방전가공조건이 결정되어야 한다<sup>13</sup>.

$$J_m = I_p \cdot \tau_p \cdot S^{-1} \cdot (\tau_p + \tau_r + \tau_w)^{-1} \text{ (A/cm}^2\text{)}$$

$$= I_p \cdot D \cdot S^{-1} \text{ (A/cm}^2\text{)}$$
(2)

여기서,  $\tau_p$ : 펄스 온타임 ( $\mu$ s)  
 $\tau_r$ : 휴지시간 ( $\mu$ s)  
 $\tau_w$ : 지연시간 ( $\mu$ s)  
 $S$ : 방전가공 면적 ( $\text{cm}^2$ )  
 $I_p$ : 피크전류 (A)

$$D = \tau_p \cdot (\tau_p + \tau_r + \tau_w)^{-1}$$
(3)

여기서 지연시간  $\tau_w$ 는 펄스온타임  $\tau_p$ 와 휴지시간  $\tau_r$ 에 비하여 매우 작은 값이므로 식(3)으로 표기된 duty factor를 식(4)와 같이 단순화시킬 수 있다<sup>15,7,9</sup>.

$$D = \tau_p \cdot (\tau_p + \tau_r)^{-1}$$
(4)

평균 가공전류밀도는 방전가공 위치에 대한 공구전극의 투영면적과 평균 가공전류에 의해 결정된다<sup>19</sup>. Fig.3은 방전가공 위치에 대한 공구전극의 투영면적을 나타낸 것으로 3차원 방전가공은 방전가공 위치에 따라 방전가공면적이 다르다는 것을 알 수 있다. 따라서 3차원 방전가공에서 평균 가공전류밀도를 일정하게 유지하며 가공하기 위해서는 방전가공 위치에 대한 정확한 방전가공면적의 계산이 요구된다.

이제 그리드탐색법을 이용하여 모델링된 전극의 기하학적 형상정보와 방전가공깊이에 상당하는 XY 평면과의 교선을 구하여 방전가공면적을 계산하는 방법을 제시하고자 한다.

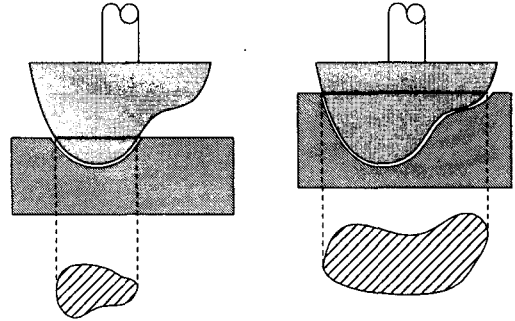


Fig. 3 Projected discharge area to a tool position

전극을 모델링한 곡면과 방전가공 위치에 해당하는 평면과의 교선은 폐곡선이므로 교선으로 이루어진 모든 폐곡선 내부의 면적을 계산하면 방전면적을 쉽게 계산할 수 있다. 각각의 교선은 일련의 교점들로부터 정의되며, 이들 교점들을 연결한 다각형의 면적을 구함으로써 교선내부의 면적을 계산할 수 있다. Fig.4에서 교선이 n+1 개의 점  $P_0, P_1, \dots, P_n$ 으로 이루어진 다각형으로 근사되었다고 하자. 삼각형  $OP_0P_1$ 에서 다각형의 한 변을 구성하고 있는 선분의 위치벡터를 각각  $a_0, a_1$ 라고 할 때 삼각형 OAB의 벡터면적은  $(a_0 \times a_1)/2$ 가 되므로 다각형 전체의 면적은 다음과 같이 계산된다<sup>18</sup>.

$$S = |(a_0 \times a_1)/2 + (a_1 \times a_2)/2 + \dots + (a_n \times a_0)/2|$$
(5)

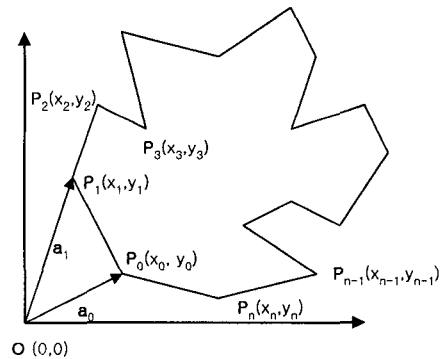


Fig. 4 Calculation of a polygon area

전극곡면과 방전가공위치에 대한 평면과의 교선이 다수인 경우 각 교선 커브로 이루어져 있는 폐곡선의 면적을 모두 합하면 방전가공 위치에서의 방전면적이 된다. 그러나 Fig.5와 같이 교선

CV<sub>2</sub>로 둘러싸인 폐곡선의 내부는 방전가공 되지 않는 영역이므로 실제 방전면적은 교선 CV<sub>1</sub>으로 둘러싸인 면적 S<sub>1</sub>에서 면적 S<sub>2</sub>를 빼주어야 한다.

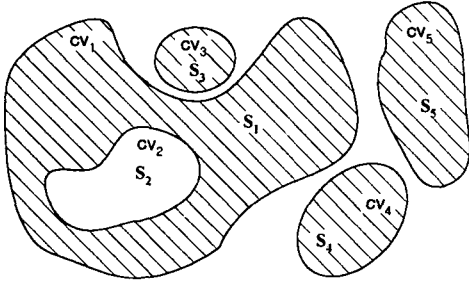


Fig. 5 Projected discharge areas

따라서 정확한 방전가공면적을 계산하기 위해서는 전체 교선들로부터 방전이 이루어지지 않는 영역에 해당하는 교선을 구별해 내야 한다.

방전가공이 되지 않는 영역의 교선을 판정하기 위하여 Fig.6 과 같이 O로 표시된 교선 상의 한 점에서 임의의 한 방향으로 설정한 반직선과 나머지 다른 교선들과의 교점(판정교점)을 찾는다. 반직선과 교선들 간의 판정교점들은 Fig.6 에서 x로 표시하였다. 만약 이들 판정교점의 수가 짝수개이면 해당된 교선에 둘러싸인 영역은 방전가공되는 영역이고, 판정교점의 수가 홀수개이면 해당교선에 의하여 둘러싸인 영역은 방전가공되지 않는 영역으로 판정한다. 예를 들어서 교선 CV<sub>1</sub>상에서 설정된 한 점(O로 표시)에서 설정된 반직선은 동일한 교선인 CV<sub>1</sub>제외한 나머지 교선 가운데 CV<sub>3</sub>와 CV<sub>5</sub>에 대하여 각각 2개의 교점을 갖는다. 반직선과 만나는 교점의 수가 짝수이므로 CV<sub>1</sub>으로 둘러싸인 영역 S<sub>1</sub>에서는 방전가공이 이루어진다.

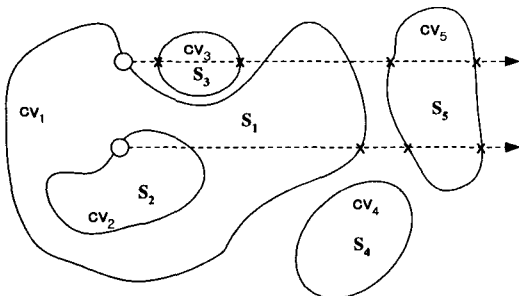


Fig. 6 Discrimination of concave areas

반직선은 계산의 편의를 위하여 X 축이나 Y 축에 평행하게 정하는 것이 바람직하다. 반직선이 교선으로 이루어진 폐다각형과 접할 때, 접점은 교선다각형의 꼭지점에서 발생하게 되며, 이 경우 2개의 판정교점이 존재하는 것으로 정한다.

Fig.7 과 같이 교선 다각형의 연속한 세 꼭지점을 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>라고 하자. 여기서 가운데 점 P<sub>2</sub>를 판정교점이라고 할 때 반직선은 P<sub>2</sub>를 지나게 된다. 반직선의 단위방향벡터를 u 라고 하자. 이때 판정교점이 Fig.7(a)와 같이 접점인 경우 식(6)을 만족하게 된다.

$$(\mathbf{u} \times \mathbf{a})_z - (\mathbf{u} \times \mathbf{b})_z > 0 \tag{6}$$

혹은

$$(u_1 a_2 - u_2 a_1)(u_1 b_2 - u_2 b_1) > 0$$

여기서  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3) = \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2$   
 $\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3) = \mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_2$   
 $c_{iz}$ : 벡터 c 의 z 성분

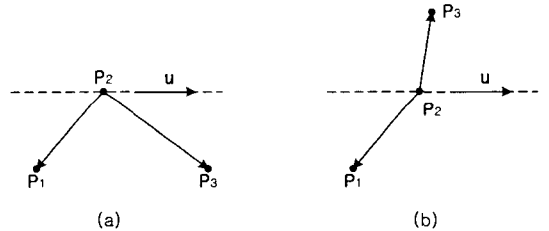


Fig. 7 Discrimination of tangential point

공구전극의 곡면식으로부터 방전면적을 구하는 과정을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 식(1)을 이용하여 전극의 곡면식과 가공위치에 따른 수평면과의 교선들을 구한다.
- (2) 교선으로 둘러싸인 영역에 대하여 가공과 미가공 여부를 조사한다.
- (3) 식(5)를 이용하여 가공면적을 계산한다.

#### 4. 방전가공조건 결정

방전가공에서 최적 가공조건이란 황삭의 경우 전극의 소모가 적고 가공속도가 최대가 될 수 있는 가공조건이며, 정삭의 경우 제품에 요구되는 표면거칠기를 만족시킬 수 있는 가공조건을 의미한다. 본 연구는 황삭에서 전극소모비(ε)가 1%이하인 무소모 영역에서 전극이 손상되지 않는 범위

에서 최대 방전에너지로 가공할 수 있도록 방전면적을 기초로 가공조건을 결정할 수 있는 방법을 제안한 것이다.

방전에너지는 피크전류치( $I_p$ ), 펄스온타임( $\tau_p$ ), 휴지시간( $\tau_r$ )에 의해 결정되는데, 피크전류치  $I_p$ 는 식(2)로부터 식(7)과 같이 쉽게 유도될 수 있다. 피크전류치( $I_p$ )는 공구의 가공위치에 대한 방전면적이 계산되면 평균 가공전류밀도  $J_m$ 와 duty factor  $D$ 를 일정한 값으로 고정함으로써 방전면적에 적절한 피크전류치  $I_p$ 를 결정할 수 있다.

$$I_p = S \cdot J_m \cdot D^{-1} \quad (7)$$

피크전류치  $I_p$ 가 결정되면 펄스온타임  $\tau_p$ 와 휴지시간  $\tau_r$ 을 결정해야 하는데, 연구[5,6,7]에 의하면 전극소모비  $\epsilon$ 는 피크전류치  $I_p$ 와 펄스온타임  $\tau_p$ 에 따라 식(8)과 같이 결정된다.

$$\epsilon = \frac{1.5 I_p^{1.74}}{\tau_p^{1.35}} \quad (8)$$

따라서 전극소모비를 적절한 값으로 고정하면 식(9)과 같이 펄스온타임  $\tau_p$ 를 구할 수 있다.

$$\tau_p = \left( \frac{1.5 \cdot I_p^{1.74}}{\epsilon} \right)^{1/1.35} \quad (9)$$

본 연구에서는 황삭방전에 적합한 무소모 방전가공이 가능하도록 전극소모비가 1%가 되도록 고정하였다.

식(9)로부터 펄스온타임  $\tau_p$ 가 결정되면 식(4)의 duty factor 식으로부터 식(10)과 같이 절연회복을 위해 필요한 휴지시간  $\tau_r$ 를 결정할 수 있다.

$$\tau_r = (1 - D) \cdot \tau_p \cdot D^{-1} \quad (10)$$

휴지시간  $\tau_r$ 이 작으면 즉, duty factor  $D$ 가 크면 가공속도가 증가하지만 너무 크면 휴지시간  $\tau_r$ 이 짧아지므로 절연회복이 되기 전에 전압이 다시 인가되어 방전가공이 매우 불안정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 방전가공 속도가 빠르고 안정된 방전가공이 가능한 duty factor  $D$ 를 경험적으로 0.6으로 고정하고 전극소모비( $\epsilon$ )는 1%로 고정하였으

며, 방전가공이 진행되는 동안 평균 가공전류밀도가  $5A/cm^2$ 를 유지할 수 있도록 주요 방전가공조건을 결정하였다. Fig.8은 이상과 같이 제안된 방법으로 방전깊이에 대한 방전면적을 계산하고, 방전면적에 적절한 방전가공조건을 결정하는 과정을 나타낸 것이다. Fig.8에서  $cz$ 는 현재 전극의 가공위치이고,  $tz$ 는 최종 방전가공 위치이며,  $dz$ 는 방전깊이의 변위이다.

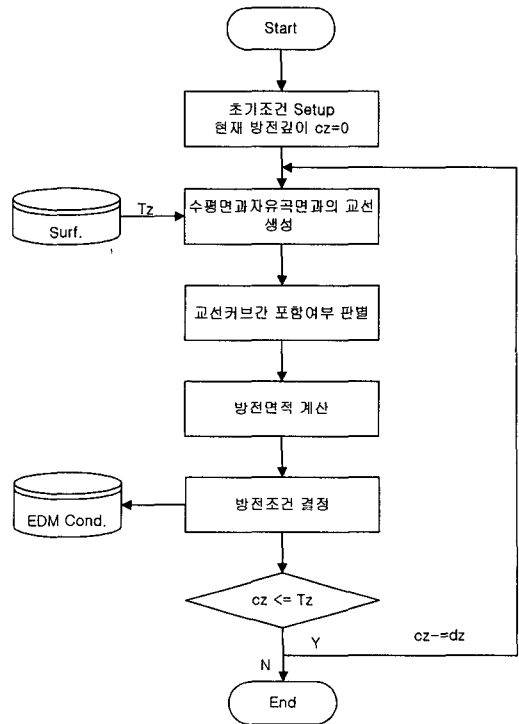


Fig. 8 Procedure for determination of EDM parameters

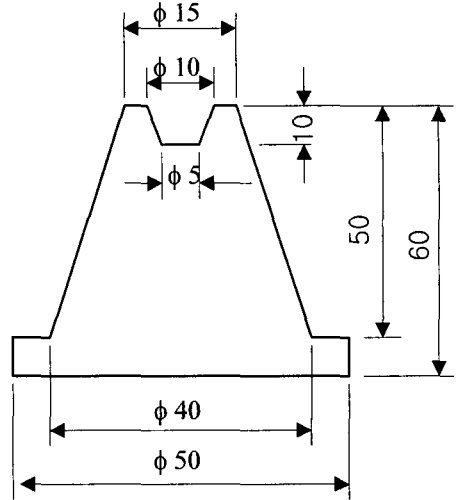
### 5. 적용 사례

본 실험에서 전극재질과 가공물 재질을 각각 그래파이트와 SKD-11을 사용하였으며, 가공조건은 충분한 실험을 거쳐 결정된 이론실험식[5,6,7]을 기초로 하였다.

Table1은 제안된 방법으로 방전면적에 적절한 방전가공조건을 결정한 결과이고, Fig.9는 시스템에서 결정된 조건으로 가공된 형상이다.

Table 1 Discharge area and machining parameters

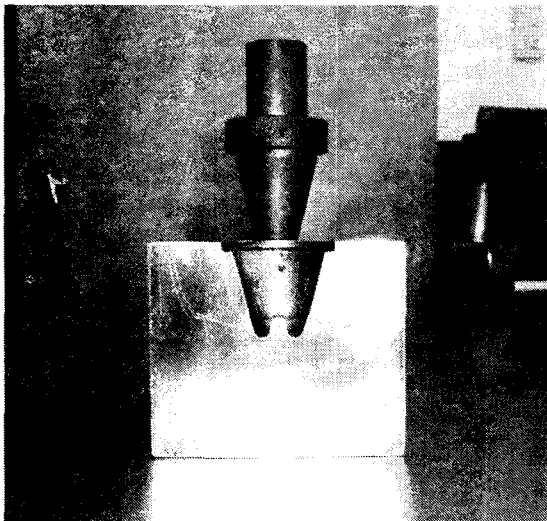
depth(cz) (mm)	area (cm <sup>2</sup> )	I <sub>p</sub> (A)	τ <sub>p</sub> (μs)	τ <sub>r</sub> (μs)
1	1	8	19	12
5	2	16	48	32
10	3	25	85	56
15	4	33	122	81
20	5	41	161	107
25	6	50	209	139
30	7	58	253	168
35	8	66	298	198
40	10	83	401	267
45	11	91	452	301
50	13	108	564	376
55	20	166	981	654
60	20	166	981	654



(b)

Fig. 9 Geometric shape of a tool electrode

Fig.9의 (a)는 방전 가공후의 가공된 형상과 전극형상을 비교하기 위하여 가공물을 절단한 후 전극을 가공물 위에 올려놓은 상태의 사진이며, (b)는 전극의 단면도이다. Fig.10은 방전깊이 cz(depth)에서 전극 단면 형상이다. 여기서, cz는 Fig.9의 (a)를 기준으로 하면 전극의 하단으로부터의 높이이고, (b)를 기준으로 하면 도면의 상단으로부터의 방전깊이(depth)이다.



(a)

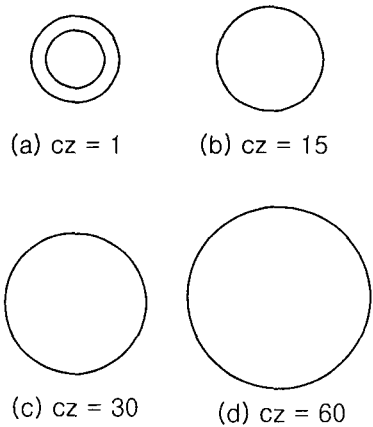


Fig. 10 Intersection curves at a tool discharge position

시스템에 의해 결정된 Table1의 가공조건으로 실제 가공해본 결과 Fig.9와 Fig.10처럼 전극과 가공물의 손상 없이 안정된 상태로 가공할 수 있었다. 본 연구에서는 전극소모율을 1%로 가정하여 가공조건을 결정하였으나 실제 가공 후 측정된 결과 1.2%로 나타났는데 이는 대체로 만족할 만한 결과라고 사료된다.

## 6. 결과 및 기대효과

지금까지 방전가공은 숙련된 작업자의 오랜 경험에 의하여 가공조건이 결정되고 있다. 본 연구에서는 기존의 방전가공조건 결정 방법을 탈피하여 공구전극의 기하학적 형상을 모델링한 전극의 형상정보로부터 방전위치에 따른 방전면적을 계산하고 이를 기초로 최적 방전가공조건을 결정할 수 있도록 하였다. 제안된 방법에 따라 결정된 가공조건으로 여러 실험을 수행해 본 결과 전극과 가공물 모두에 손상이 없이 안정된 상태로 가공할 수 있었는데, 이는 수많은 실험을 통하여 결정된 이론실험식을 기초로 방전가공조건을 구하고 있기 때문으로 판단된다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

- (1) 공구전극의 모델링된 곡면식으로부터 방전위치에 따라 정확한 방전면적을 계산하여 적절한 방전가공조건을 결정할 수 있다.
  - (2) 방전가공에 대한 경험이 적은 작업자도 적절한 가공조건으로 가공할 수 있다.
  - (3) 공구전극 형상의 CAD 데이터로부터 방전가공조건을 자동적으로 결정할 수 있으므로 설계와 제조공정을 통합한 제조 시스템의 구현이 가능하다.
7. 김창호, 방전가공, 기전연구사, 1995.
  8. 강홍모, "2 차원 형상배치에 대한 CAM 패키지 개발에 관한 연구," 울산대학교 석사학위논문, 1994.
  9. 류제구, 방전가공, 대광서림, 1994.
  10. M. M. Tseng, "A Systematic Approach to the Adaptive Control of the Electro-Discharge Machining Process," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 100, pp. 303-310, 1978.

## 참고문헌

1. 이견범, 주상윤, 왕지남, "2 단계 신경망 추정에 의한 와이어 컷 방전가공조건 선정," *산업공학*, Vol. 10, No.3, pp. 125-132, 1997.
2. 이견범, 주상윤, 왕지남, "와이어 가공조건 자동 생성 2 단계 신경망 추정," *한국정밀공학회*, Vol. 15, No. 2, pp. 7-13, 1998.
3. 이견범, 주상윤, 왕지남, "신경망을 이용한 2 차원 방전가공조건 선정," *산업공학*, Vol. 11, No. 1, pp. 145-153, 1998.
4. Choi, B.K., *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier, NewYork, 1990.
5. 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.
6. 齊藤長男, 毛利尙武, 高鷲民生, 高谷政典, *放電加工技術*, 日刊工業新聞社, 1997.