

## Z-map을 이용한 3차원 방전가공조건의 결정방법

주상윤\*, 이건범\*\*

### A Method for Determination of 3D-Electrical Discharge Machining Parameters Using Z-map

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

#### ABSTRACT

This paper presents a method for determining machining parameters in electrical discharge machining process (EDM) based on discharge area. The parameters are the peak value of currents, the pulse-on time, and the pulse-off time, on which the EDM performance depends chiefly. The optimal machining parameters are closely related on discharge area, which can be calculated from a tool electrode and a discharge height. In the paper the discharge area is obtained from NC code for machining the tool electrode instead of its geometric model. The method consists of following three steps. First a Z-Map model is constructed from the NC code. Secondly, the discharge area is obtained from the Z-Map model and a Z-height. Finally, the machining parameters are calculated from the discharge area. An introduced example shows that the machining parameters are calculated by using a Z-map model obtained from the machining data for a tool electrode.

**Key words** : EDM (Electrical Discharge Machining), discharge area, Z-map, Machining parameters

#### 1. 서 론

방전가공은 방전시 발생하는 열을 이용한 전기적 가공법으로 가공물의 강도, 경도와 같은 기계적 성질에 관계없이 전도체는 모두 가공이 가능하므로 기계적 가공법으로 가공이 어려운 난삭재 가공에 널리 이용되고 있다. 과거에는 절삭가공에 비하여 가공시간이 오래 소요되는 문제점으로 인하여 방전가공의 사용이 매우 제한적이었으나 최근 고성능 전원공급장치가 개발된 이후 고전류를 이용한 고속가공이 가능하게 되어 방전가공은 널리 사용되고 있다.

방전가공에서 방전면적은 가공조건과 밀접한 관련이 있으므로 적절한 가공조건을 결정하기 위해서는 정확한 방전면적을 계산해야 한다. 현재까지 방전면적을 기초로 최적 방전가공조건을 결정하기 위한 연구는 일부 있었으나<sup>1,2,3</sup>, 전극형상에 대한 곡면식이 없을 경우에 대한 연구는 발견할 수 없었다.

\*중신회원, 울산대학교 산업공학과

\*\*정회원, 홍성기능대학 전산응용기계과

본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 전극가공용 NC코드로부터 전극의 형상을 Z-map모델링하고, Z-map모델로부터 계산된 방전면적을 기초로 최적 방전가공조건을 결정할 수 있는 방법을 제안하였다.

#### 2. 방전가공인자와 가공성능

방전가공은 열에너지를 이용한 전기적 가공법으로 극간에 공급되는 에너지의 크기에 의해 가공성능이 결정된다. 대표적 가공특성은 가공속도, 공구마모, 표면거칠기 등이 있으며, 이들에 영향을 미치는 주요 인자들을 간략히 언급하면 다음과 같다.

##### ■ 피크전류치 $I_p$

피크전류치의 크기에 따라 방전가공에 의해 제거되는 크레이터 깊이, 반경 및 체적이 결정된다. 통상적으로 공구전극의 용삭량이 증가하면 가공물의 용삭량이 증가하고 표면거칠기가 거칠어지며 금속 제거량이 증가하므로 가공속도가 빨라진다.

■ 펄스온타임  $\tau_p$

두 전극간에 전압이 인가되는 시간으로 전압 인가 시간에 따라 가공속도 및 전극소모비 등이 결정된다. 일반적으로 에너지 전달이 최단시간에 이루어질 때 방전에 의한 소재 제거량이 최대가 되지만, 방전기간이 지나치게 짧으면 두 전극 모두에서 많은 양의 금속이 제거되므로, 공구전극의 마모를 최소화하기 위해서는 다소 긴 펄스기간을 필요로 한다. 또한, 펄스온타임이 길면 전극표면에 형성되는 보호막 때문에 전극소모가 감소하는데, 동일한 에너지에 대하여 펄스기간이 길다는 것은 전류가 작다는 것을 의미하므로, 펄스기간을 적절히 설정하면 전극소모를 감소시키고 미려한 가공표면을 얻을 수 있다<sup>4,5,6</sup>.

■ 휴지시간  $\tau_s$

휴지시간은 두 전극간에 인가되는 전압을 차단하는 시간으로 이 기간동안 절연이 회복되어 연속적인 방전가공이 가능하다. 휴지시간이 짧으면 단위시간당 방전발생 횟수가 많아지므로 가공속도를 증가시킬 수 있으나, 휴지시간이 지나치게 짧으면 절연회복이 완전하게 되지 못하므로 가공이 불안정해진다. 이처럼 휴지시간은 가공안정성과 밀접한 관계가 있다.

3. 전극가공용 NC코드로부터 Z-map모델링

Z-map 모델은 X,Y평면에 정의된 일정한 간격의 격자점(i, j)에서 곡면의 z값을 표현하는 방식<sup>7</sup>으로, 3축 NC가공 절차를 컴퓨터에서 모의 가공하고 검증할 수 있도록 각 격자점에서의 높이 값을 가지도록 고안된 개념이다<sup>7</sup>. 여기서 각 격자점에서 한번이 격자크기인 g이고 높이가 격자점에서의 높이(z)에 상당하는 솔리드(Solid) 사각기둥으로 Z-map모델을 해석하면, Z-map으로부터 방전가공 위치에 대한 방전 면적을 쉽게 계산할 수 있다.

전극가공에 사용되는 공구는 평 엔드밀, 볼 엔드밀, 라운드 엔드밀 등이 있으나 NC가공된 전극의 형상은 최종 정삭에 의한 형상이므로, 곡면의 정삭에 사용되는 볼 엔드밀의 공구궤적을 산출하는 방법을 이용하였다<sup>7</sup>.

전극가공용 NC코드로부터 전극의 형상을 Z-map 모델링 하기 위한 절차는 다음과 같다.

Step 1: 전극가공용 NC코드로부터 전극형상의 최대점 Max(Max.x, Max.y, Max.z)와 최소점 Min(Min.x, Min.y, Min.z)을 구한다.

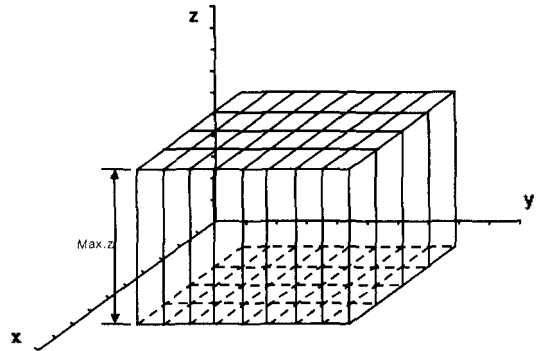


Fig. 1. Initialized Z-map.

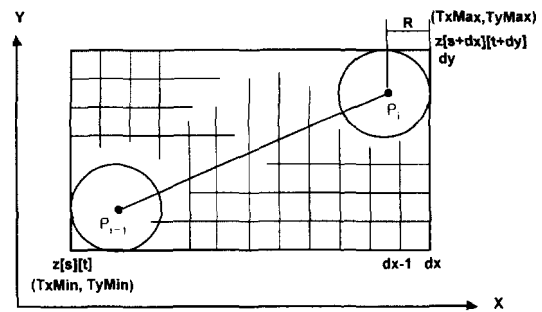


Fig. 2. Min-Max Box of two points.

Step 2: Step 1에서 계산된 최대점과 최소점이 이루는 XY평면상의 구간을 일정한 격자간격 g로 분할한다. 분할된 X방향의 격자수 Nx와 Y방향의 격자수 Ny를 구한 후 Fig. 1과 같이 각 격자점(x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>)에서의 z<sub>p</sub>값을 Step 1에서 구한 Max.z로 초기화한다.

Step 3: NC-code의 두 점 P<sub>i-1</sub>, P<sub>i</sub>가 실린더의 중심점이고 실린더 반경이 전극가공에 사용된 볼엔드밀의 반경이므로, Fig. 2와 같이 두 점으로 이루어진 가공가능 영역(Min-Max Box)을 결정한다.

Step 4: Step 3에서 결정된 격자영역에서 각 격자점에 대한 높이 z<sub>p</sub>를 구한 다음, 기존의 z값보다 작으면 해당 격자 점의 z값을 계산된 z<sub>p</sub>로 갱신한다.

$$Z[i][j]=\text{Min}(Z[i][j], Z_p)$$

Step 5: 모든 공구이동 점들에 대하여 Step 3과 Step 4를 반복한다.

4. 방전가공조건 결정

본 연구에서 제안된 최적가공조건 결정방법은 방전면적에 기초하여 가공조건을 결정하는 것이다. 먼저, NC코드로부터 공구의 이동궤적을 추적하여 공구에 의해 제거되고 남은 전극의 기하학적 형상을

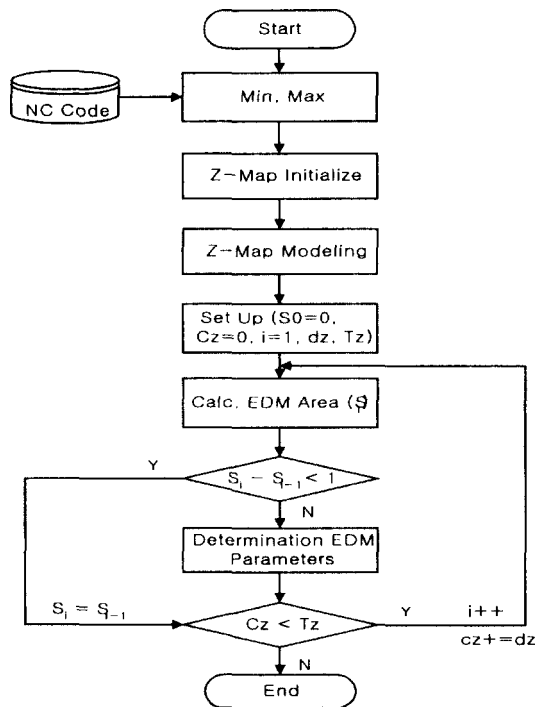


Fig. 3. Procedure for determination of EDM Parameters.

Z-map 모델링한다. 모델링된 Z-map정보로부터 방전 깊이에 대한 방전면적을 구한 다음, 이를 기초로 방전면적에 적절한 가공조건을 결정할 수 있도록 하였다. 본 시스템에서 방전가공조건을 결정하는 과정은 Fig. 3과 같다.

4.1 방전면적 계산

형조방전가공은 상부의 램에 설치된 전극이 하부의 테이블상에 위치한 가공물 방향(-Z)으로 이동하여 가공하므로, 방전면적은 Fig. 4와 같이 가공물의 최대높이 이하에 있는 전극부분의 형상을 XY평면에 투영한 면적이다<sup>14)</sup>. 방전가공은 전기적 가공법이므로 가공속도를 높이기 위해서는 전극의 손상이 없는 범위에서 최대 방전에너지를 공급해야 하는데, 최대 방전에너지는 방전면적을 기초로 결정된다.

본 연구에서는 3절에서 언급된 알고리즘을 이용하여 전극형상을 Z-map모델링 하였으며, Z-map을 한 변의 길이가 격자간격(g)이고 높이가 z인 솔리드 사각기둥 들이 연속적으로 정렬되어 있는 것으로 해석하였다. 이와 같이 Z-map이 솔리드 개념으로 해석되었으므로 임의의 가공위치(Cz)에서의 방전면적은 Fig. 5와 같이 각 격자 점에서의 높이(z)가 현재 가공위치 Cz보다 큰 격자의 수를 계산하여 격자면적을 곱하면

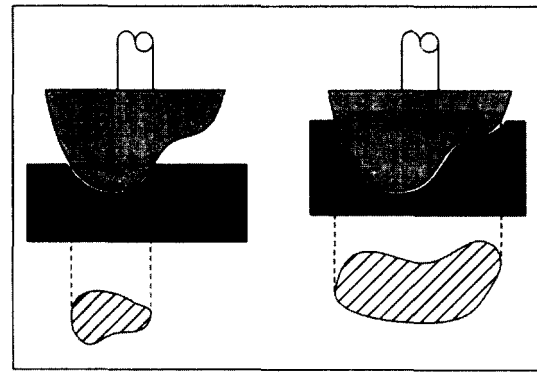


Fig. 4. Discharge areas to the EDM positions.

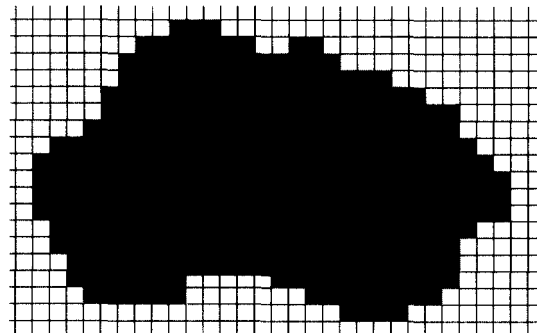


Fig. 5. Concept of a discharge area.

된다.

즉, 임의의 가공위치에서의 방전면적은  $Area=N * g^2$  이다.

여기서, g: 격자 간격

Cz: 임의의 방전가공 위치

Nx: X축 방향의 격자 수

Ny: Y축 방향의 격자 수

Z[i][j]: 임의의 위치에서의 Z값

4.2 방전면적으로부터 방전조건의 결정

본 연구에서 최적 가공조건은 공구전극과 가공물의 재질에 적합한 평균 가공전류밀도( $I_m$ )를 유지할 수 있는 가공조건으로 정하였다<sup>14)</sup>. 일반적으로 공구전극 재질로 가장 많이 사용되고 있는 동(Cu)과 그래파이트에 대하여 실험한 결과, 방전가공에 적합한 평균 가공전류밀도는  $5A/cm^2$  정도가 가장 효율이 좋은 것으로<sup>14)</sup> 알려져 있으므로, 본 연구에서는 NC코드로부터 전극의 기하학적 형상을 모델링한 Z-map으로부터, 가공위치에 대한 방전면적을 계산하여, 이를 기초로 평균 가공전류밀도가  $5A/cm^2$ 를 유지할 수 있도록 가공조건을 결정하였다.

전류밀도는 단위면적당 평균 가공전류의 크기로 피크전류  $I_p$ 와 펄스온타임  $\tau_p$ 에 의해 결정되는데, 식 (1)은 단발방전에 대한 전류밀도를 나타낸 것이다. 연속방전가공에서 방전면적에 적절한 가공조건은 식 (1)의 평균 가공전류밀도  $J_m$ 를 일정하게 유지할 수 있는 방전가공 조건이다.

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

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

여기서,

$\tau_p$ : 펄스온타임 ( $\mu s$ )

$\tau_r$ : 휴지시간 ( $\mu s$ )

$\tau_w$ : 지연시간 ( $\mu s$ )

S: 방전가공 면적 ( $cm^2$ )

$I_p$ : 피크전류 (A)

D=Duty factor

$$D = \tau_p \cdot (\tau_p + \tau_r + \tau_w)^{-1} \quad (2)$$

여기서, 지연시간  $\tau_w$ 는 펄스온타임  $\tau_p$ 와 휴지시간  $\tau_r$ 에 비하여 매우 작은 값이므로 무시할 수 있으므로 식(2)를 식(3)과 같이 단순화 할 수 있다<sup>[4,5]</sup>.

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

피크전류  $I_p$ 는 식 (1)로부터 식 (4)와 같이 쉽게 결정할 수 있으며, Z-map으로부터 방전면적이 계산 되면 평균 가공전류밀도  $J_m$ 과 duty factor를 일정한 값으로 고정함으로써 계산된 방전면적에 적절한 피크전류  $I_p$ 를 결정할 수 있다.

$$I_p = \frac{S \cdot J_m}{D} \quad (4)$$

피크전류  $I_p$ 가 결정되면, 펄스온타임  $\tau_p$ 와 휴지시간  $\tau_r$ 을 결정해야 하는데, 식 (4)에서 미지수가 2개이므로 전극소모비에 대한 이론실험식 (5)을 이용하여 풀어야 한다. 여기서, 전극소모비를 적절한 값으로 고정하면 식 (6)과 같이 펄스온타임  $\tau_p$ 를 구할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{1.5 I_p^{1.74}}{\tau_p^{1.35}} \quad (5)$$

$$\tau_p = \left( \frac{1.5 \cdot I_p^{1.74}}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{1.35}} \quad (6)$$

피크전류  $I_p$ , 펄스온타임  $\tau_p$ 가 결정되면, 식 (3)의 duty factor 식으로부터 휴지시간  $\tau_r$ 을 식 (7)과 같이 결정할 수 있다.

$$\tau_r = \frac{(1-D)\tau_p}{D} \quad (7)$$

duty factor는 전체방전시간에 대한 방전가공시간 비율이므로, duty factor가 크면 가공속도가 증가하지만, duty factor가 너무 크면 절연회복이 되기 전에 다시 전압이 인가되므로 방전가공이 불안정하게 된다. 이러한 점을 고려하여, 본 연구에서는 가공속도와 가공안정성을 고려하여 duty factor를 적절한 값으로 고정하였으며, 전극소모비는 황삭방전가공에서 무소모조건을 유지할 수 있도록 적절한 값으로 고정하였다.

## 5. 적용사례

전극가공용 NC코드로부터 전극의 기하학적 형상을 Z-map모델링하여 가공위치에 대한 방전면적을 계산하고, 이를 기초로 방전면적에 적절한 가공조건은 Table 1과 같다. 본 시스템에서 결정된 가공조건으로 실제 가공한 결과 전극의 손상 없이 효율적으로 가공할 수 있었다.

본 연구에서 전극재질은 전극제작에 적합한 그래파이트를 사용하였으며, 생산성 향상과 가공안정성을 고려하여 duty factor를 0.4로 고정하고, 전극소모비는 무소모 방전이 가능하도록 1%로 고정하였으며, 격자크기는 1 mm로 하였다. 피크전류치, 펄스온타임, 펄스오프타임을 제외한 나머지 가공 인자들은 경

Table 1. EDM parameters based on discharge area

position [mm]	S[cm <sup>2</sup> ]	I <sub>p</sub> [A]	τ <sub>p</sub> [μs]	τ <sub>r</sub> [μs]
2	2	10	50	75
4	5	25	125	188
6	8	40	156	234
8	10	50	209	314
10	15	75	352	528
15	18	90	445	668
17	20	100	510	765
20	21	105	543	815
22	23	115	611	917
25	25	125	680	1020
30	28	140	788	1182
32	30	150	861	1292
35	31	155	898	1347
37	33	165	973	1460
40	35	175	1050	1575
45	35	175	1050	1575

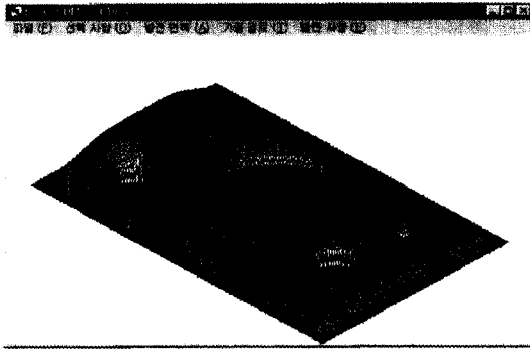


Fig. 6. Z-map constructed with NC code.

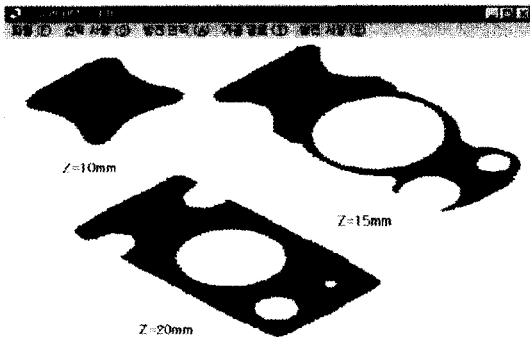


Fig. 7. EDM regions corresponding to the EDM positions.

형치를 적용하여 방전면적에 대한 평균 가공전류밀도가 5A/cm<sup>2</sup>를 유지할 수 있도록 가공조건을 결정하였다.

Fig. 6는 전극가공용 NC-code로부터 볼 앤드밀의 궤적을 추적하여 전극의 형상을 Z-map모델링한 결과이며, Fig. 7은 모델링된 Z-map정보로부터 임의의 가공위치에서 가공되는 전극의 단면 형상을 도시한 것이다.

#### 4. 결론 및 기대효과

본 연구는 전극가공용 NC-code로부터 가공위치에 대한 방전면적을 결정하는 방법을 제시하였으며 아울러 계산된 방전면적을 기초로 하여 최적 방전가공조건을 결정할 수 있도록 하였다. 본 연구로부터 기대할 수 있는 효과는 다음과 같다.

1) 전극가공용 NC-code를 이용하여 계산된 방전면적으로부터 3차원 방전가공에 적합한 가공조건을 결정할 수 있다.

2) 방전가공의 경험이 적은 작업자도 최적가공조

건으로 작업할 수 있게 되어 생산성을 향상시킬 수 있다.

3) 가공조건이 수시로 변하는 3차원 방전가공에서도 가공조건이 자동적으로 결정되므로 무인작업이 가능하다.

4) 전극가공용 NC데이터로부터 방전가공조건을 자동적으로 결정할 수 있으므로 설계와 제조공정을 통합한 제조 시스템의 구현이 가능하다.

#### 참고문헌

- 이건범, 주상윤, 왕지남, "2단계 신경망 추정에 의한 와이어 컷 방전가공조건 선정", IE Interface, Vol. 10, No. 3, pp. 125-132, 1997.
- 이건범, 주상윤, 왕지남, "와이어 가공조건 자동생성 2단계 신경망 추정", 한국정밀공학회지 제15권 제2호, pp. 7-13, 1998.
- 이건범, 주상윤, 왕지남, "신경망을 이용한 2차원 방전가공 조건선정", IE interfaces
- 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.
- 김창호, "방전가공", 기전연구소, 1995.
- 이건범, 주상윤, 왕지남, "전극 저소모 방전조건 결정을 위한 2단계 신경망 접근", 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 7, pp. 13-20, 1998.
- 최병규, 정연환, "Z-map을 사용한 코의가공과 NC-code의 검증", 산업공학회지, 제8권, 제3호, pp. 155-169, 1995.
- 류재구, 방전가공, 대광서림, 1994.
- 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.



#### 주 상 윤

1977년 서울대학교 산업공학과 학사  
 1979년 한국과학원 산업공학과 석사  
 1980년 한국과학원 산업공학과 박사  
 1979년~현재 울산대학교 산업공학과 교수  
 관심분야: 2차원 모델링, CAD/CAM, 제조시스템 자동화



#### 이 건 범

1992년 울산대학교 기계공학과 학사  
 1994년 울산대학교 기계공학과 석사  
 1998년 울산대학교 산업공학과 박사  
 1996년~현재 대전기술대학 홍성캠퍼스 조교수  
 관심분야: 방전가공, CAD/CAM, 공작기계 설계, 생산기술