

전극의 3차원 측정데이터로부터 방전가공조건 결정

주상윤*, 이건범**

Determination of Electrical Discharge Machining Parameters from the CMM data of a Electrode

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

Abstract

This paper proposes a method for determining optimal EDM parameters based on discharge area from the physical model of a tool electrode. Main parameters, which affect the EDM performance, are peak value of currents, pulse-on time, and pulse-off time. Such parameters are closely dependent on the discharge area in EDM process. In this paper the discharge area is estimated from the CMM scanning data to the tool electrode. The method is very useful when any geometric information to the tool electrode is not provided from tool modeler or producer. The method consists of following four steps. First a triangulation mesh is constructed from the CMM data. Secondly, the z-map is modeled from the triangulated mesh. Thirdly, the discharge area is estimated from intersection between the z-map model and a z-height plane. Finally, the machining parameters are easily calculated by some known EDM equations to the discharge area. An example is introduced to show that the machining parameters are calculated from the CMM data to a tool electrode.

Key Words : EDM (방전가공), CMM (3차원 측정기), z-map

1. 서론

금형재료는 강도, 경도등과 같은 기계적 성질이 매우 우수한 재료이므로 기계적 가공법에 의한 금형가공은 효율이 낮다. 이에 비해 방전가공은 방전시 발생하는 열을 이용한 전기적 가공법으로 재료의 기계적성질에 관계없이 도전성 재료는 모두 가공이 가능할 뿐만 아니라 가공 정

밀도 또한 우수하므로 금형 가공에 가장 적합한 가공법 중의 하나로 부각되어 응용범위가 점차 확산되고 있다. 따라서 산업현장에서는 방전가공의 가공성을 향상시키기 위하여 최적 방전가공조건을 결정하는 방법에 관하여 많은 관심을 갖게 되었다.

현재까지 최적 방전가공조건을 결정하기 위한 연구는 와이어 방전가공에서 가공두께에 적절한 방전가공조건을

* 울산대학교 산업공학과
** 홍성기능대학 전산응용기계과

결정하기 위한 연구^(1,2)가 있었으며, 형조방전가공에서는 2차원 방전가공용 공구전극의 윤곽곡선으로부터 방전면적을 계산하여 평균 가공전류밀도를 일정하게 유지할 수 있는 방전가공조건을 결정하는 방법⁽³⁾에 대한 연구가 있었다. 3차원 방전가공에서 최적 방전가공조건을 결정하기 위한 연구는 공구전극의 기하학적 형상을 모델링한 곡면식으로부터 방전면적을 계산하여 방전면적에 적절한 방전가공조건을 결정하는 방법⁽⁴⁾과 공구전극을 가공하기 위한 NC코드로부터 공구전극의 기하학적 형상을 z-map 모델링하여 이로부터 방전면적을 계산하고 방전면적에 적절한 방전가공조건을 결정하는 방법⁽⁵⁾에 대하여 연구된바 있다.

본 연구는 공구전극의 곡면식이나 공구전극을 가공하기 위한 NC코드가 없고 실물의 공구전극만 있을 경우, 3차원 측정데이터를 기초로 방전면적에 적절한 방전가공조건을 결정하는 방법을 제안한 것이다.

2. 주요 방전가공 인자

방전가공에 영향을 미치는 인자는 크게 가공액의 유동상태, 서보기구의 응답성, 가공액의 온도 등과 같은 비전기적 인자와 피크전류치, 펄스온타임, 펄스오프타임 등과 같은 전기적 인자로 분류할 수 있다. 방전가공에서 최적 방전가공조건을 결정하기 위해서는 각각의 방전가공인자의 영향을 정확하게 해석할 수 있어야 하지만 방전가공에 영향을 미치는 인자들 간의 상호적인 영향을 정확하게 해석하기란 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 방전 성능과 밀접한 연관이 있는 대표적인 인자들을 결정하는 방법을 연구한 것으로 주요 가공 인자들의 영향은 다음과 같다.

- (1) 피크전류치 (I_p): 극간에 흐르는 전류의 최대치로 방전에너지와 밀접한 관련이 있으므로 가공속도 및 표면거칠기에 큰 영향을 미친다.
- (2) 펄스온타임(τ_p): 극간에 전압이 인가되는 시간으로 방전에너지와 밀접한 관련이 있어 가공속도 및 표면거칠기에 큰 영향을 미치며 전극 소모율에도 많은 영향을 미친다.
- (3) 휴지시간(τ_r): 전극간에 전압이 인가되지 않는 시간으로 이 기간동안 절연이 회복되어 연속적인 방전가공이 가능하도록 하는 방전가공 인자로 가공안정성과 밀접한 관계에 있다.

3. CMM데이터로부터 공구전극의 기하학적 형상 모델링

자유곡면의 설계와 생산은 자동차, 우주항공, 조선 및 금형가공 분야에서 널리 응용되고 있다. 현재까지 자유곡면에 대한 연구는 CAD/CAM환경하에서 이미 알고있는 곡면의 수학적 표현에 기초하여 자유곡면을 모델링하고 이를 효율적으로 가공하기 위한 방법에 관한 것이 대부분이었다. 그러나 요즘은 수학적으로 알려져 있지 않은 자유곡면을 모델링하고 가공하기 위하여 실물 모델로부터 점 데이터를 측정하여 곡면에 대한 수학적 모델을 생성하는 역공학(Reverse engineering)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁶⁾

본 연구는 전극을 측정한 3차원 점 데이터로부터 전극의 기하학적 형상을 삼각형 다면체로 근사화하고, 이를 z-map 모델링하여 방전면적을 쉽게 계산할 수 있도록 하기 위한 것이다.

3차원 측정기로 측정하는 간격은 Fig. 1과 같이 형상의 복잡한 정도에 따라 측정간격을 결정하는데, 전극의 형상이 복잡하면 측정간격을 좁게 하고 전극의 형상이 단순하면 측정간격을 넓게 설정한다.

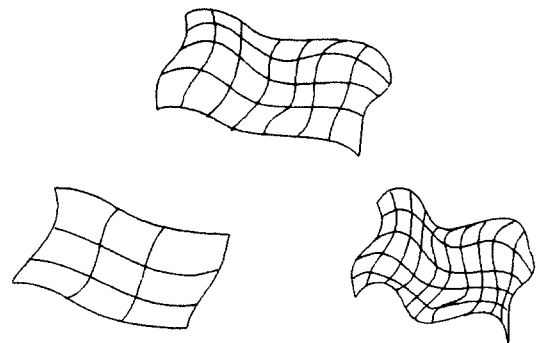


Fig. 1 Determination of measuring interval

측정간격이 결정되면 3차원 측정기를 이용하여 전극을 측정하고, 측정된 두 열의 점 데이터로부터 가장 근접한 점들로 이루어진 4점을 판별하여 삼각망을 형성한다. 삼각망형성은 Fig. 2와 같이 측정 점들로부터 삼각형 생성이 가능한 OAB와 OAC의 대각선 길이 d_1 과 d_2 를 비교하여 길이가 짧은 대각선을 포함한 삼각형을 선택한다. 이와 같은 방법으로 전체 측정 점들을 삼각망으로 형성할 수 있다.

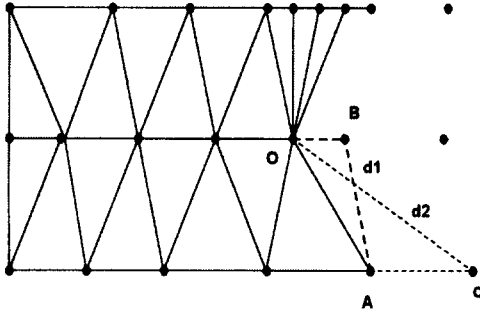


Fig. 2 Determination of triangular polyhedron with CMM data

일단 삼각망이 형성되면 이를 기초로 전극의 형상을 z-map 모델링 할 수 있다. z-map 모델은 Fig. 3과 같이 XY평면에 정의된 일정한 간격의 격자점(i,j)에서만 곡면의 Z값을 표현하는 방식이다. z-map은 본래 3축 NC가공절차를 컴퓨터에서 모의가공하기 위하여 각 격자점에서 높이 값만을 갖도록 고안된 개념이지만⁷⁾, 여기서는 방전면적을 계산하기 위하여 Fig. 4와 같이 한 변의 길이가 격자 간격이고 높이가 격자점의 높이(z)에 상당하는 솔리드 사각기둥으로 해석하였다.

공구전극의 기하학적 형상이 삼각형 다면체로 근사화되면 Fig. 5와 같이 삼각망을 구성하는 세개의 측정점으로부터 식(1)과 같이 평면방정식을 계산한다.

$$ax + by + cz - d = 0 \quad (1)$$

여기서

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{s}}{|\mathbf{r} \times \mathbf{s}|} = (a, b, c)$$

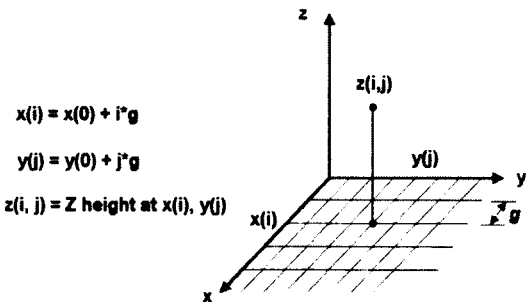


Fig. 3 Concept diagram of z-map

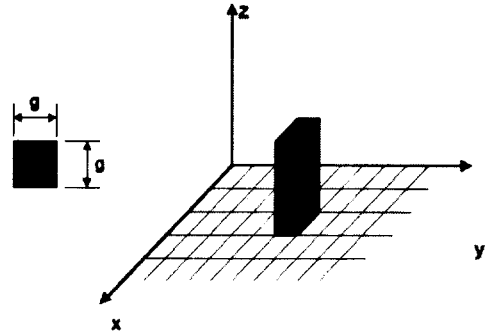


Fig. 4 Concept diagram of modified z-map

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{s} &= \mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{d} &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{P}_2 \end{aligned}$$

평면방정식이 계산되면 세 점으로 이루어진 다면체의 XY평면구간을 일정한 격자간격으로 나누고 각 격자점에 대한 평면의 z값을 계산하여 공구전극의 기하학적 형상을 z-map 모델링한다.⁽⁵⁾

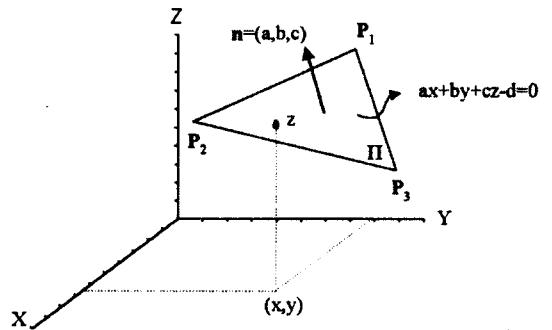


Fig. 5 Z-value of polyhedron at a grid point

4. 방전가공조건 결정

본 연구는 전극 실물을 3차원 측정기로 측정한 점 데이터로부터 방전면적을 계산하여 최적 방전가공조건을 결정하는 방법에 대한 것으로 적용절차는 Fig. 6과 같다.

최적 방전가공조건이란 가공비용을 최소로 하거나 생산성을 최대로 할 수 있는 가공조건⁽⁷⁾을 의미한다. 방전가공

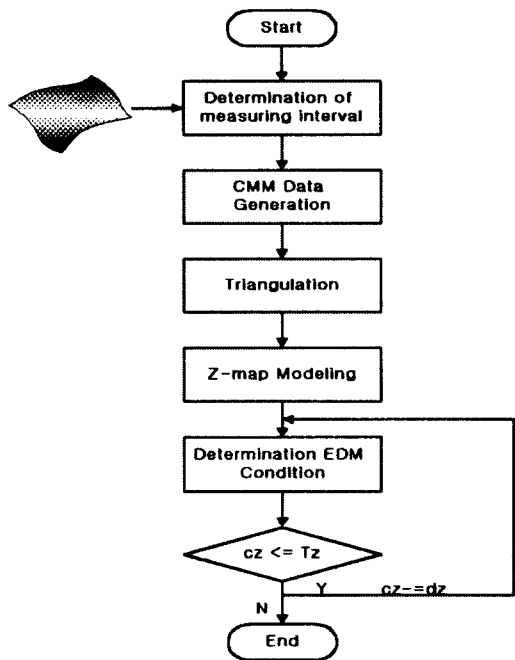


Fig. 6 Procedure for determination of EDM parameters with CMM data

에서 최적 가공조건을 결정하려면 먼저 방전면적을 계산해야 하는데, 본 연구에서는 전극을 3차원 측정기로 측정 한 후 측정 데이터로부터 전극형상을 삼각형 다면체로 근사화하고 이를 z-map모델링하여 방전가공위치에 대한 방전면적을 계산하였다.

본 연구에서는 z-map을 솔리드(solid) 개념으로 해석 하였으므로 z-map으로부터 임의의 방전가공위치(Cz)에서의 방전가공 면적은 각 격자점에서의 높이(Z)가 방전가공위치(Cz)보다 큰 격자의 수를 계산하여 식(2)와 같이 한 변이 격자의 길이(g)인 정사각형의 면적을 곱하면 된다.

$$S = N * g^2 \tag{2}$$

여기서

g : Grid격자의 크기

Cz : 임의의 방전가공 위치

N : 격자점의 높이 Z[i][j]가 방전가공위치 Cz 보다 큰 격자의 수

이상과 같이 3차원 측정 데이터로부터 공구전극 형상을

다면체로 근사화하여 공구전극의 방전면적을 계산하는 과정을 요약하면 다음과 같다.

- 단계 1 : 실물형상에 따라 측정간격을 결정한다. 즉, 공구전극의 형상이 복잡하면 측정간격은 작게 하고 형상이 단순하면 측정간격을 크게 한다.
- 단계 2 : 공구전극을 3차원 측정기로 측정한다.
- 단계 3 : 3차원 측정 데이터로부터 최대, 최소점을 구한다.
- 단계 4 : z-map Grid간격을 결정한다.
- 단계 5 : z-map을 초기화 한다.
- 단계 6 : CMM데이터를 삼각형 다면체로 근사화 한다.
- 단계 7 : 근사화 된 다면체를 z-map모델링 한다.
- 단계 8 : 방전깊이에 따라 방전면적을 계산한다.

방전가공에서 최적 가공조건을 결정하는 것은 전극과 가공물의 재질에 적합한 전류밀도(J)를 일정하게 유지할 수 있도록 전기 조건을 결정하는 것이다.^(4,5) 방전가공에 적합한 평균 가공전류밀도는 전극의 재질과 곡성에 따라 다르나 일반적으로 5A/cm² 정도가 가장 효율이 좋은 것으로 알려져 있다.^(9,10) 따라서 본 연구에서는 최적 평균전류밀도가 5 A/cm²가 되도록 방전가공조건을 결정 하였다. 이때 평균 가공전류밀도는 단위면적 당 평균 가공전류의 크기로 피크전류 I_p와 펄스온타입 τ_p에 의해 결정되는데 식(3)은 단발방전에 대한 전류밀도를 나타낸 것이다.

실제 방전가공에서 방전가공면적의 변화에 적절한 최적 가공조건으로 방전가공하기 위해서는 식(3)의 평균 가공전류밀도(J_m)가 일정하도록 방전가공조건을 결정해야 한다.^(9,10)

$$\begin{aligned}
 J_m &= \frac{\tau_p \cdot I_p}{S(\tau_p + \tau_r + \tau_w)} \text{ (A/cm}^2\text{)} \\
 &= \frac{I_p \cdot D}{S} \text{ (A/cm}^2\text{)} \tag{3}
 \end{aligned}$$

여기서

τ_p : 펄스 온타입 (μs)

τ_r : 휴지시간 (μs)

τ_w : 지연시간 (μs)

S : 방전가공 면적 (cm²)

I_p : 피크전류 (A)

D : Duty factor

$$D = \frac{\tau_p}{(\tau_p + \tau_r + \tau_w)} \tag{4}$$

여기서 지연시간 τ_w 는 펄스온타입 τ_p 와 휴지시간 τ_r 에 비하면 매우 작은 값이므로 식(4)로 표기된 Duty factor를 식(5)와 같이 단순화시킬 수 있다.^(9,10)

$$D = \frac{\tau_p}{(\tau_p + \tau_r)} \quad (5)$$

평균 가공전류밀도는 방전가공 위치에 대한 공구전극의 투영면적과 평균 가공전류에 의해 결정되는데, 제안된 방법을 이용하여 방전가공 위치에 대한 방전면적이 결정되면 식(3)으로부터 최적 방전가공조건을 결정한다.

방전면적이 계산되면 전류밀도를 일정하게 유지할 수 있는 방전가공조건이 결정되어야 하므로 식(3)에서 Duty factor D를 일정한 값으로 고정하고 방전가공면적에 적절한 피크전류치 I_p 를 계산하였다.

피크전류치 I_p 가 결정되면 펄스온타입 τ_p 와 휴지시간 τ_r 을 결정해야 하는데, 피크전류치 I_p 와 펄스온타입 τ_p 에 따라 식(6)과 같이 전극소모비 ϵ 가 결정되므로^(9,10) 전극소모비를 적절한 값으로 고정하면 식(7)과 같이 펄스온타입 τ_p 를 구할 수 있다.

펄스온타입 τ_p 가 결정되면 Duty factor D가 고정되었으므로 식(5)의 Duty factor 식으로부터 식(8)과 같이 절연회복을 위해 필요한 휴지시간 τ_r 을 결정할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1.5I_p^{1.74}}{\tau_p^{1.35}} \quad (6)$$

$$\tau_p = \left(\frac{1.5 \cdot I_p^{1.74}}{\epsilon} \right)^{1/1.35} \quad (7)$$

$$\tau_r = \frac{(1-D)}{D} \tau_p \quad (8)$$

이와 같은 방법으로 방전가공위치에 따라 방전면적에 기초한 적절한 방전가공조건을 결정하면, 방전가공 위치에 따라 방전가공 면적이 변하는 3차원 방전가공에서 효율적인 방전가공조건으로 가공할 수 있다.

5. 적용 사례

공구전극에 대한 기하학적 정보가 전혀 없는 경우 공구전극의 실물을 3차원 측정기로 측정한 점 데이터를 이용하여 가공시간을 최소화 하기 위한 황삭 방전가공조건을 결정할 수 있는 CAM시스템을 개발하였으며, 개발된 시

스템을 이용하여 결정된 방전가공조건으로 실제 가공한 실례를 소개하고자 한다.

전극의 재질은 가볍고 전기전도도가 우수하며 전극소모율이 낮고 고온강도가 높아 전극으로서 우수한 성질을 가지고 있으므로 널리 사용되고 있는 그래파이트를 사용하였으며, 가공물 재질은 금형용 재료로 널리 사용되고 있는 SKD-11을 사용하였다. Fig. 7은 전극실물을 3차원 측정기로 측정한 데이터의 일부를 도시한 것이고, Fig. 8은 Fig. 7과 같이 얻어진 측정점 데이터들을 삼각형 다면체로 근사화한 전극의 일부를 도시한 것이다. Fig. 9는 삼각형 다면체로 근사화된 공구전극의 형상을 z-map모델링한 일부를 도시한 것이며, Fig. 10은 z-map모델로부터 임의의 방전가공높이에 해당되는 방전면적을 추출하여 도시한 것이다.

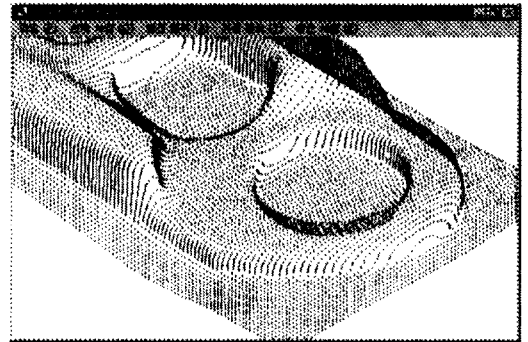


Fig. 7 CMM data of physical tool electrode

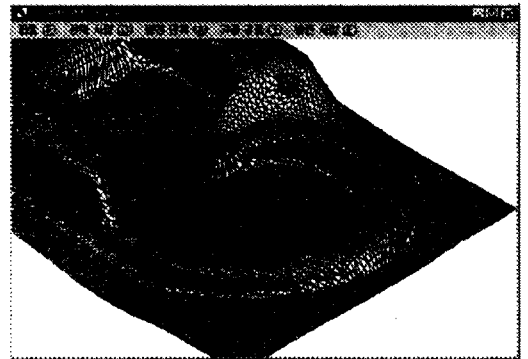


Fig. 8 Triangulated shape of tool electrode

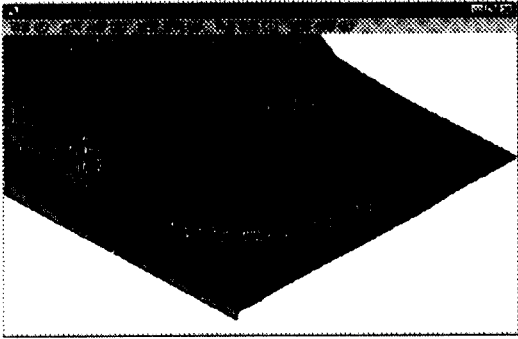


Fig.9 Tool electrode shape constructed by z-map

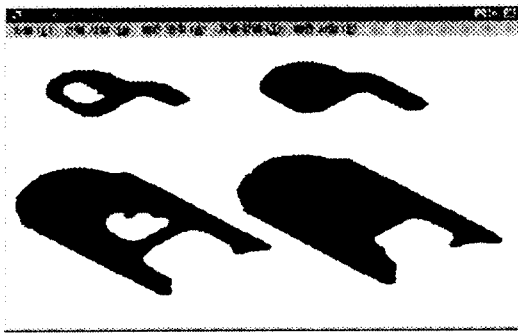


Fig.10 Discharge area at arbitrary positions

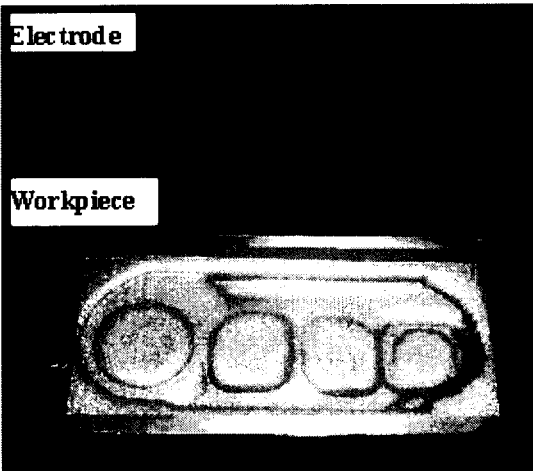


Fig.11 Photographs of electrode and workpiece

Table 1 EDM parameters based on discharge area

Depth [mm]	Area [cm ²]	I_p [A]	τ_p [(s)]	τ_r [(s)]
1	2	10	26	39
2	5	25	86	128
3	8	40	157	235
4	8	40	157	235
5	10	50	209	314
6	11	55	236	355
7	13	65	293	440
8	14	70	323	484
9	16	80	383	575
10	16	80	383	575
11	18	90	446	669
12	19	95	478	717
13	20	100	511	766
14	20	100	511	766
15	22	110	578	866
16	22	110	578	866
17	23	115	612	917
18	25	125	681	1021
19	25	125	681	1021
20	25	125	681	1021

duty factor는 방전가공의 생산성 향상 및 가공안정성을 고려하여 0.4로 하고 전극소모비는 무소모 방전이 가능하도록 1%로 하였으며 가공효율을 증진시키기 위하여 평균 가공 전류밀도를 5A/cm²를 유지할 수 있도록 개발된 CAM시스템을 이용하여 방전가공조건을 Table 1과 같이 결정하였다.

개발된 CAM시스템을 이용하여 결정된 황삭 방전가공 조건으로 가공한 결과 Fig. 11과 같이 전극이나 가공물의 손상 없이 가공물의 표면거칠기는 정삭이 가능한 200 μ m R_{max} 정도를 얻었으며 전극의 소모량도 1%이내를 유지할 수 있는 우수한 가공결과를 얻을 수 있었다.

6. 결 론

본 연구는 공구전극에 대한 기하학적 정보가 없고 가공하고자 하는 실물만 있을 때 공구전극을 3차원측정기(CMM)로 측정한 점 데이터로부터 공구전극의 형상을 3각망으로 근사화하고 이를 z-map모델링 하여 이를 기초로 가공위치에 대한 방전면적을 계산하여 방전가공면적

에 적절한 가공조건을 결정할 수 있는 방법을 제안한 것이다. 본 방법이 제안되기 전까지 산업체에서는 방전가공 위치에 대한 자유곡면의 방전가공면적을 계산할 수 없어 작업자의 경험에 의존하여 방전가공조건을 결정하였으므로, 효율적인 방전을 기대할 수 없었다. 본 연구를 통하여 효율적인 황삭 방전가공조건을 결정할 수 있는 새로운 기준을 제시하였다.

제안된 방법에 의해 결정된 방전가공조건으로 실험한 결과 만족할 만한 성과를 얻을 수 있었으며 다음과 같은 측면에서 기여한 바가 크다고 할 수 있다.

- (1) 가공물의 3차원 측정 데이터를 기초로 역기구학을 이용하여 공구전극의 기하학적 형상을 모델링 할 수 있으므로 가공물의 곡면식과 같은 모델링 정보가 없는 전극도 가공할 수 있다.
- (2) z-map의 개념을 솔리드(solid)로 해석하여 방전가공 위치에 대한 방전면적을 쉽게 계산할 수 있다.
- (3) 작업자에 경험에 의존하던 기존의 방식을 탈피하고 방전면적을 기초로 체계적인 방전가공조건을 자동으로 결정할 수 있으므로 방전가공의 자동화 실현의 가능성을 제시하였다.

참고 문헌

- (1) 이진범, 주상윤, 왕지남, "2단계 신경망 추정에 의한 와이어 컷 방전가공조건 선정", IE Interface, Vol.10, No.3, pp. 125~132, 1997.
- (2) 이진범, 주상윤, 왕지남, "와이어 가공조건 자동생성 2단계 신경망 추정", 한국정밀공학회지, 제15권 제2호, pp. 7~13, 1998.
- (3) 이진범, 주상윤, 왕지남, "신경망을 이용한 2차원 방전가공조건 선정", IE Interface, Vol.11, No.1, pp. 145~153, 1998 .
- (4) 주상윤, 이진범, "공구전극 곡면에 의한 3차원 방전가공조건결정", 한국정밀공학회지, Vol. 17, No. 1, pp. 27~33, 2000.
- (5) 주상윤, 이진범, "Z-map을 이용한 3차원 방전가공조건 결정방법", 한국 CAD/CAM학회지, Vol.4, No.4, pp. 355~359, 1999 .
- (6) P.Gu, X.Yan, "Neural Network approach to the reconstruction of freeform surfaces for reverse engineering", Comput.-Aided Des. Vol. 27, pp. 59~64, 1995.
- (7) 최병규, 정연찬, "z-map을 사용한 모의가공과 NC-code의 검증", 산업공학회지, 제 8권, 제3호, pp. 155~169, 1995.
- (8) 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 .
- (9) 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.
- (10) 齊藤長男, 毛利尙武, 高鷲民生, 古谷政典, 放電加工技術, 日刊工業新聞社, 1997.