

## 플라즈마 모델을 이용한 방전가공의 전기적 거동 예측

김기원\*, 정영훈, 민병권, 이상조 (연세대학교 기계공학부)

Prediction of electric dynamics of electric discharge machining using Plasma model

K. W. Kim, Y. H. Jeong, B.-K. Min, S.-J. Lee (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)

### ABSTRACT

In the electro-discharge machining the machining performance is closely related to the characteristics of discharge which can be identified from electrical behavior in gap between workpiece and electrode. Therefore, the accurate prediction of electrical behavior in electro-discharge machining (EDM) is useful to process control and optimization. However, any simulation model for prediction of electrical behavior in EDM process has never been reported until now. In this study, a simulation model is developed to analyze the electrical behavior of electro-discharge plasma which significantly influences electrical behavior in EDM process. For the purpose of this the fundamentals of electro-discharge mechanism such as inception, propagation, formation of plasma channel and termination are investigated to accurately predict the cycle of discharge plasma in EDM. As a result, a mathematical model of electro-discharge plasma is constructed with considering the fundamentals of electro-discharge plasma. Consequently, it is demonstrated that the developed model can predict the electrical behavior of plasma such as electron density in various conditions.

Key Words : Micromachining (마이크로 가공), Electro-Discharge Machining (방전가공), Plasma (플라즈마), Discharge current(방전전류)

### 1. 서론

방전가공 (electro-discharge machining)은 전기적 에너지를 이용하여 금속을 가공하는 전통적 정밀 가공 기술이다. 이러한 방전가공은 기계적 접촉 없이 가공이 가능하기 때문에 기계적 가공 에너지와 관련된 가공기의 동특성, 공구의 변형에 의한 가공 오차 등의 문제가 최소화될 수 있는 점 등으로 인해 미세가공 분야에서 효과적인 가공기술의 하나로 평가를 받고 있다. 이로 인해 최근에는 방전가공을 미세 정밀가공기술로 발전시킨 마이크로 방전가공에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

방전가공 공정은 가공물의 제거에 사용되는 전기적 에너지의 양과 재료 제거량과의 복잡한 관계를 가지고 있기 때문에 최적화된 방전가공 조건을 설정하기 어렵다. 따라서 주로 전문가들의 경험적 지식과 시행착오적인 접근 방법을 통해 가공조건을

결정하고 있는 실정이다. 또한 방전 거동을 제어하여 가공 품질을 향상시킬 수 있으나 이를 위한 방전회로의 설계에는 방전 시 발생하는 플라즈마의 전기화학적 모델이 필수적이다. 따라서, 미세 정밀 가공을 위해 최적의 방전 조건을 찾기 위한 연구와 방전회로의 설계와 관련한 연구가 필수적이다. 현재까지 방전가공과 관련한 다양한 모델들이 제안되었다. 그러나 대부분의 모델들은 실험적 데이터로부터 얻어진 열에너지를 기반으로 한 가공 모델에 그치고 있다<sup>1,2,3</sup>. 따라서 방전 특성을 제시하고 방전 조건을 결정하며, 방전 회로의 설계 등에 활용하기 위해서는 방전 전원부부터 가공 현상까지를 전체적으로 연결할 수 있는 모델이 필요하다.

본 연구에서는 통합된 방전가공 시뮬레이션을 위한 핵심 부분의 하나로서 방전 전원부와 가공 모델 사이에 연결될 방전 시의 플라즈마 전압, 전류의 거동에 관한 모델을 개발하였다. 개발된 모델은

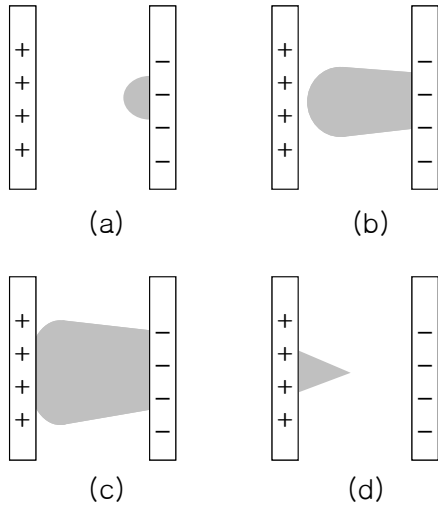


Fig. 1 Plasma cycle: (a) Inception; (b) Propagation; (c) Plasma channel; (d) Termination

전극과 가공물 사이의 전계에 따른 전하의 흐름과 양을 계산하는 것을 핵심 내용으로 한다. 개발된 모델을 통해 방전 시의 전극과 가공물 사이에 존재하는 방전 플라즈마의 전기적 거동을 예측할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 플라즈마 모델

### 2.1 방전가공에서의 플라즈마

방전가공에서는 등유 (kerosene)나 탈이온수 같은 액체 유전물질을 방전액 (dielectric fluid)으로 사용한다. 액체는 고체와 같이 단위 체적당 분자수가 많으나 고체와 달리 분자가 자유롭게 움직이므로 유동에서는 기체와 비슷하다. 그러나 액체는 기체에 비해 전기 전도 특성이나 절연 파괴 특성이 복잡하다.

현재 방전을 연구하는 분야에서도 기체 절연 파괴 이론에 비해 액체 절연 파괴에 관한 확립된 이론은 제시된 바 없다. 대부분의 경우 액체 절연 파괴 이론에 기체 절연 파괴 이론을 접목하여 사용하게 되는데, 본 연구에서도 몇 가지 가정을 통해 기체 절연 파괴 이론을 사용하여 플라즈마 모델을 구성하였다.

#### 2.1.1 플라즈마 생성 주기

Figure 1 은 방전가공에서 플라즈마의 주기를 나타낸 것이다. 방전가공에서 플라즈마는 5 ~ 30  $\mu\text{m}$  간격의 평행한 금속 사이에서 개시(inception), 진행(propagation), 유지(plasma channel), 소멸(termination)의 단계를 거치면서 반복적으로 발생한다. 플라즈마의 개시 단계에서는 음극의 표면에서 유전체(dielectric material)로 전자가 방출된다. 진행단계에

서는 전계에 의해 전자가 양극으로 이동하고 전리 과정에서 양이온이 발생한다. 발생한 양이온은 전계에 의해 전자보다 느린 속도로 음극으로 이동한다. 이동된 전자가 양극에 도달하면 전극과 가공물 사이에서 플라즈마가 채널이 생성되고 전류가 흐른다. 이때 내부의 전계 조건과 외부의 전압 조건에 따라 플라즈마 채널이 유지되거나 소멸한다.

#### 2.1.1 전계 모델

전계는 플라즈마 내의 전자와 이온의 동적 거동과 전자의 전리(ionization)에 영향을 준다. 전극과 가공물 사이(양 극간)에 전압이 가하면 식 (1)과 같은 전계가 형성된다<sup>4</sup>.

$$E_c = \frac{V}{d} \quad (1)$$

여기서,  $V$  와  $d$  는 각각 입력 전압(양 극 사이의 전위차)과 전극과 가공물 사이의 거리이다.

음극에서 전자가 방출되면 전하의 분포에 따라 전계는 변화하게 되며, 이때 음극으로부터의 거리에 따른 전계는 식 (2)와 같다.

$$E(x) = E_c + \frac{Q(x)}{\epsilon} \quad (2)$$

여기서,  $x$  는 음극으로부터의 거리,  $Q(x)$  는 음극부터  $x$  까지 전하량,  $\epsilon$  는 내부 유전율이다.

#### 2.1.2 음극에서의 전자의 방출

전계의 크기에 따라 금속에서 유전체로 전자가 방출된다. 대표적인 전자 방출 이론으로는 Schottky 효과와 터널효과가 있다<sup>5</sup>. 일반적으로 전계가 클수록 전자 방출량이 많아진다. 본 연구에서는 전자 방출이 온도에 무관하고 전계의 강도와 연관되어 있다고 가정하여 터널 효과를 고려한 Fowler-Nordheim Equation<sup>5</sup>을 이용하였다. 식 (3)은 본 연구에서 이용한 전자 방출 시의 음극 표면에서의 전류 밀도를 보여준다.

$$J = CE^2 \exp\left(-\frac{D}{E}\right) \quad (3)$$

여기서,  $J$  는 전류 밀도이고  $C, D$  는 Fowler-Nordheim Equation 에서 제시한 상수이다.

#### 2.1.3 전자와 이온의 이동과 전리

음극에서 방출된 전자는 전계에 의해 이동하면서 유전체를 전리 시킨다. 전리량은 Townsend의 전리 이론<sup>4</sup>에 의해 식 (4)와 같이 얻어질 수 있다.

$$dN_e = dN_i = \alpha N_e dx \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$  는 전리상수,  $N_e$  는 전자수,  $dx$  는 이동 거리를 나타내며, 식 (4)로부터 전리량이 이들에 비례함을 알 수 있다. 또한, 전리와 동시에 음이온과

동일한 양의 양이온이 발생한다.

이온과 전자가 동시에 존재하면 이온과 전자간의 재결합이 발생하게 된다. 재결합되는 전자의 수는 재결합 상수  $\beta$ , 전자수  $N_e$ , 양이온수  $N_i$ 에 비례하기 때문에 식 (5)와 같이 주어질 수 있다.

$$dN_e = -\beta N_e N_i \quad (5)$$

전자는 밀도차에 의한 확산이 발생하며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = D_e \nabla^2 n_e \quad (6)$$

여기서,  $n_e$ 는 전자 밀도,  $D_e$ 는 확산 계수이다.

따라서, 전리와 이동, 재결합 그리고 확산을 모두 고려하였을 때의 전자 밀도의 변화는 식 (4), (5), (6)으로부터 식(7)과 같이 얻어진다<sup>6</sup>.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \nabla(n_e u_e) + D_e \nabla^2 n_e + \alpha n_e u_e - \beta n_e u_e \quad (7)$$

### 2.1.5 플라즈마의 유지와 소멸

플라즈마 채널이 형성되면 전극과 가공물 사이의 전위차가 줄어들면서 외부 전계 ( $E_c$ )의 영향이 줄어들고 채널내의 내부 전계 ( $Q(x)/\epsilon$ )만 형성된다. 이로 인한 전계 강도의 감소는 음극에서의 전자의 방출, 전자의 이동, 전리량 등을 줄여줄게 한다. 이때 강제적으로 전압을 제거하면 더욱 감소 효과가 커지고 플라즈마가 소멸하게 된다.

### 2.1.6 플라즈마 모델의 구성

이상의 식 (1)~(6)으로부터 방전가공에서의 플라즈마 모델을 구성하였다. Figure 2는 방전가공 시 플라즈마 주기에 대한 전기적 거동 시뮬레이션의 순서도를 보여준다. 시뮬레이션에서 방전가공의 조건은 방전 회로의 입력 전압, 공급 가능한 전류의 크기, 전극과 가공물 간의 간격 등이다.

전압이 가해지면 전극과 가공물 사이에서 일정한 크기의 전계가 형성된다. 음극 표면에서의 전계의 크기가 금속에서 특정 유전체로의 전자 방출이 가능한 조건을 만족하면 플라즈마 개시가 시작된다.

전하의 분포에 따라 결정되는 전계는 플라즈마 내부의 전자와 이온의 이동 속도, 전리, 재결합, 확산과 같은 동적 거동을 결정한다. 따라서, 시뮬레이션에서 전하의 분포는 일정 시간을 주기로 계산하도록 하였다. 각 시뮬레이션 주기마다 전하의 분포로부터 계산된 전계는 주기 동안의 전자와 이온의 이동거리, 전리량, 재결합량, 확산량을 계산하며, 다음 시뮬레이션 주기의 전하 분포를 계산한다. 새롭게 구해진 전하분포는 다음 주기의 전계를 결정하고, 이 과정이 반복된다. 최종적으로 양극으로의 전

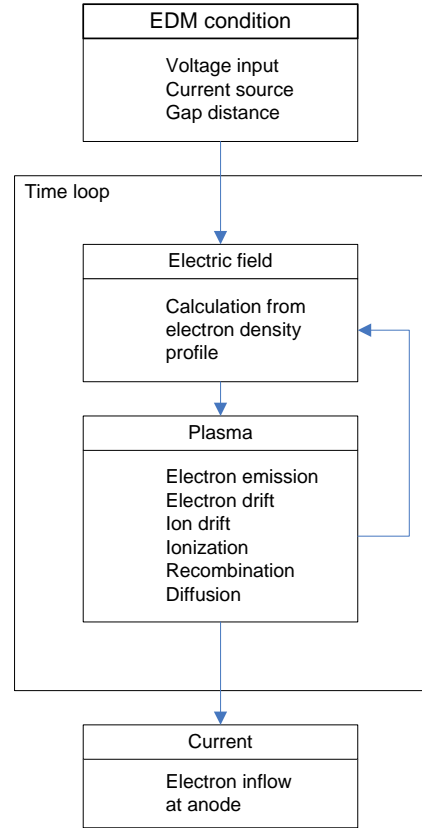


Fig. 2 Block diagram of EDM plasma simulation

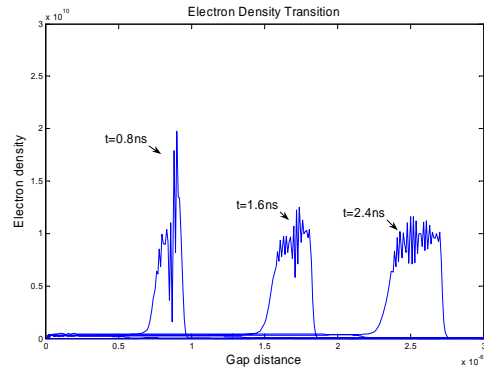


Fig. 3 Electron density transition  $t=0.8$  ns,  $1.6$  ns,  $2.4$  ns electrons move from cathode to anode

자의 유입량을 계산하여 전류파형을 얻을 수 있다

## 3. 방전 시뮬레이션

시뮬레이션을 통해 시간에 따른 전극과 가공물 사이에서의 전자의 이동에 의한 전자 밀도의 거동과 양극으로 유입된 전자 양으로부터 전류의 파형을 얻을 수 있다.

Figure 3은 0.8 nsec 간격으로 음극에서 양극으로 이동하는 전자 밀도의 분포를 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. 이로부터 시간에 따라 이동하면서 전

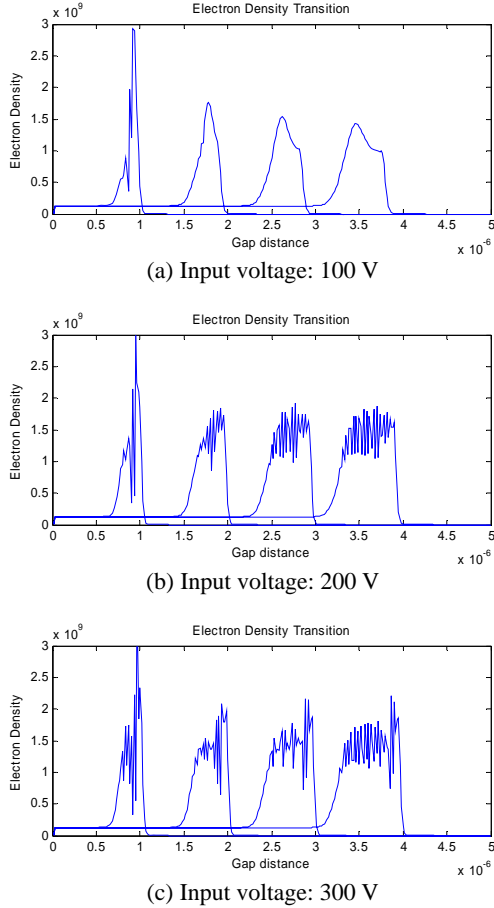


Fig. 4 Electron density behavior according to input voltage

리, 재결합, 확산에 의해 전자 밀도가 변화 함을 확인할 수 있다. Figure 4는 양 극의 간격이 5  $\mu\text{m}$  이고 방전회로에서 전류공급이 동일할 때 다양한 입력 전압에 따른 양 극 사이의 전자 밀도의 변화를 0.5 nsec 마다 보여준다. 이로부터 입력 전압의 차이에 따른 플라즈마 채널 형성 직전까지의 플라즈마의 진행 거동을 볼 수 있다.

Figure 4에서 볼 수 있듯이 입력 전압의 차이가 크더라도 음극에서 공급 가능한 전하량이 동일할 경우 플라즈마의 전자 밀도의 크기는 크게 차이나지 않음을 볼 수 있다. 입력 전압이 커짐에 따라 진행속도가 증가하는 것으로 양극에서의 단위시간 당 전하의 흐름인 전류가 증가함을 알 수 있다. 이 상으로부터 EDM 가공에서의 방전 플라즈마의 생성과 관련한 전기적 거동을 시뮬레이션을 통해 예측할 수 있음을 볼 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 통합된 방전가공 시뮬레이션을 위한 핵심 부분의 하나로서 방전 플라즈마의 전기적 거동에 관한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이를 위해 EDM 전극과 가공재 양 극단의 전계의 거동, 음극단에서의 전자 방출, 전자와 이온의 이동과 전리, 플라즈마의 유지와 소멸을 고려한 수학적 모델을 구성하였다. 개발된 시뮬레이션 모델을 이용하여 플라즈마 채널이 생성되기 직전까지의 전자 밀도와 같은 전기적 거동을 예측할 수 있음을 보였다. 특히 시뮬레이션 결과로부터 EDM의 전원부로부터 공급되는 입력 전압에 따라 전자 밀도의 거동을 확인하였다.

개발된 시뮬레이션 모델은 차후 전원부에 관한 모델과 연결되어 EDM 방전 가공 시의 전류 및 전압 등의 거동을 예측할 수 있고, 나아가 가공재의 가공 메커니즘 모델과 연결되어 EDM 가공과 관련된 통합된 시뮬레이션 모델을 구성할 수 있게 된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 산업기술개발사업인 “마이크로 전기·화학 복합형상 제거 시스템 개발” 과제의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. Yadv, V., Jain, V. K., Dixit, P. M., "Thermal stresses due to electrical discharge machining," Int. J. of Machine Tools and Manufact. 42. 877-888, 2002.
2. Snoeys, R., Dyck, F. V., "Investigation of EDM Operation by Means of Thermo-Mathematical Models," Annals of CIRP 20 (1), 1971.
3. Patel, M. R., Barrufet, M. A., Eubank, P. T., "Theoretical models of the electro discharge machining process-II. The anode erosion model," J. of Applied Physics, 66 (9), 4104-4111, 1989.
4. Kao, K. C., "Dielectric Phenomena in Solids," Elsevier Academic Press, 2004.
5. Kuffel, E., Zaengl, W.S., and Kuffel, J., "High Voltage Engineering: Fundamentals," Newnes, pp. 281 - 394.
6. Montijn, C., Ebert, U., Hundsdorfer, W., "Adaptive grid simulation of negative streamers in nitrogen in under- and overvolted gaps," XXVIIth ICPIG, Eindhoven, the Netherlands, pp18-22, 2005