

미세형조방전가공의 공구마모형상 예측 Prediction of Electrode Wear Geometry in Micro Die-sinking EDM Process

*허세곤¹, 이민규¹, 윤희택¹, 정영훈², #민병권¹, 이상조¹

*S. G. Heo¹, M. K. Lee¹, H. T. Yun¹, Y. H. Jeong², #B.-K. Min(bkmin@yonsei.ac.kr)¹, S. J. Lee¹

¹ 연세대학교 기계공학부, ² 한국산업기술대학교 기계공학과

Key words : Micro EDM, Die-sinking EDM, Electrode wear, Geometric simulation

1. 서론

방전가공은 전기적 에너지를 이용하여 전도체인 재료를 가공하는 정밀 가공 기술이다. 방전가공 기술은 재료의 경도에 상관없이 가공이 가능하고, 공구와 가공물간의 기계적인 접촉이 없기 때문에 공구의 진동, 휨이나 파손 등과 같은 문제가 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 특히, 형조방전가공을 이용할 경우 복잡한 모양의 구조물을 짧은 시간에 효과적으로 제조할 수 있다. 이러한 이유로 인해 미세구조물 제작에 있어 미세 전극을 이용한 형조방전 가공이 효과적으로 활용될 수 있다.

그러나 방전가공 기술은 공구와 가공물 사이의 방전 플라즈마에 의한 열에너지를 재료 제거의 원리로 하고 있기 때문에 가공물뿐만 아니라 공구 역시 점점 마모되는 단점을 가지고 있다. 이러한 현상은 가공물의 형상 정밀도를 저하시키고 가공량을 정확히 예측할 수 없게 하는 주요 원인이 되고, 특히 미세 전극을 사용하는 미세 형조방전가공에서는 공구의 마모가 심각한 가공 오차를 일으킬 수 있기 때문에 해결되어야 하는 문제로 인식되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 형조방전 가공에서의 공구마모와 시편의 가공형상을 예측할 수 있는 기하학적 시뮬레이션을 이용한 방법들이 발표되었다.¹⁻³ 기하학적 시뮬레이션은 공구와 시편간의 위치와 기하학적 관계를 기반으로 하여 반복되는 방전 스파크에 의한 재료 제거를 기하학적으로 해석해 나가는 방법이다. 그러나 현재까지 수행된 연구들은 미세 가공에 대한 것이 아니라 기존의 방전가공 공정을 다루고 있다. 또한, 이들 연구는 공구마모를 고려하지 않거나, 재료 제거의 기본 단위인 크레이터의 형상을 실제와 다른 판상, 육각형, 원추형으로 고려하고 있거나, 2 차원 모델링을 기반으로 하고 있기 때문에 복잡한 형상을 시뮬레이션할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 미세 형조방전 가공에서 공구의 마모로 인한 가공품질 저하를 해결하기 위하여 공구마모를 예측할 수 있는 3 차원의 기하학적 시뮬레이션을 제안한다. 제안한 시뮬레이션은 공구의 형상과 움직임, 방전 간격, 절연액 및 전극의 물성과 인가된 전기에너지에 의한 크레이터의 크기 등의 가공 인자를 고려하여 가공 중인 공구와 가공물의 형상변화를 시각적으로 표현한다. 나아가, 개발된 시뮬레이션 모델은 공구의 마모를 고려하여 원하는 가공물 형상을 얻을 수 있는 금형의 형상 설계에 모듈로써 활용될 수 있을 것이다.

2. 미세 형조방전 가공의 모델링

본 연구에서 제안하는 미세 형조방전 가공의 시뮬레이션은 크게 3 차원 기하학적 모델, 방전점 결정 모델, 재료 제거 모델로 구성된다. 3 차원 기하학적 모델은 초기 공구와 공작물의 형상과 상호 위치 관계를 정의하고 가공 중 공구의 움직임과 변화하는 전극의 형상을 표현한다. 방전점 결정 모델은 각 시뮬레이션 순간마다 스파크가 발생하게 되는 공구와 가공물에서의 방전점을 결정하고, 두 전극간의 단락여부를 판별한다. 재료제거 모델은 구해진 방전점을 기준으로 공구와 가공물에서의 크레이터를 각각 생성한다.

공구와 가공물의 3 차원 기하학적 모델링은 일정한 크기를 가지는 격자구조와 Z-map 알고리즘을 이용하여 이루어진다. Z-map 알고리즘은 3 차원 구조물의 형상을 나타내기 위한 가장 쉽고 효과적인 방법 중의 하나이다. 특히 형조방전 가공에서는 깊이 방향으로만 공구의 이송이 이루어지므로 Z-map 알고리즘은 공구와 가공물의 형상을 표현하기에 효과적인 방법이다. Fig. 1은 공구와 가공물의 3 차원 모델링에 대한 개략도이다. 공구와 가공물은 각각 다른 하나의 Z-map 으로 표현되며, 각 Z-map 은 일정한 크기를 가지는 정사각형의 작은 격자 요소로 구성되어 있다. 공구를 표현하는 Z-map 은 마모되지 않은 초기 공구의 바닥면을 기준으로 마모되는 공구의 바닥면을 표현하고, 가공물 Z-map 은 가공되지 않은 초기 가공물의 윗면을 기준으로 깊이 방향으로 가공되는 가공물의 윗면을 표현한다. 공구와 가공물은 각각의 좌표계를 가지고 있으며, 가공물 좌표계의 영점을 기준으로한 공구 Z-map 의 중심점의 위치로 공구와 가공물의 상호 위치를 계산한다. 매 시뮬레이션 순간마다의 공구의 위치 \vec{X} 와 시뮬레이션 루프간 시간 간격 Δt 는 Eqs. (1) 과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{X} &= \vec{X}_{previous} + \vec{F}\Delta t \\ \Delta t &= \frac{1}{f_{max_spark}} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\vec{X}_{previous}$, \vec{F} , f_{max_spark} 는 각각 한 단계 전 시뮬레이션 스텝에서의 공구의 위치벡터, 공구 이송속도, 최대 방전 빈도수이다. 최대 방전 빈도수는 방전이 일어날 수 있는 최대의 주파수로써 방전회로의 특성에 따라 결정되는 값이다. 공구의 이송 속도를 고려하여 매 시뮬레이션 순간의 공구의 위치가 정해지면 공구를 구성하는 모든 요소점들은 가공물에 대한 위치 정보를 가지게 된다.

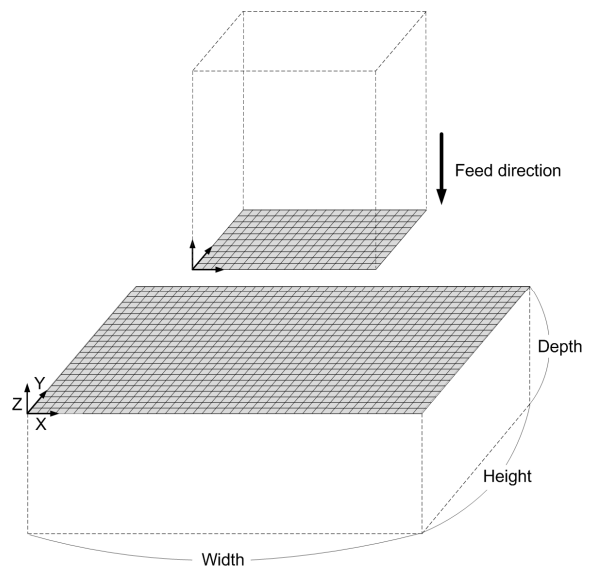


Fig. 1 Schematic diagram of 3-dimensional geometric model of micro die-sinking EDM process

각 순간 공구의 위치가 결정되면 방전점을 찾게 된다. 방전점은 실제 방전가공에서 플라즈마에 의해 에너지가 유입되어 크레이터가 생성되는 위치이다. 본 시뮬레이션에서는 공구와 가공물의 각 구성요소간의 최소거리가 방전 간극(sparking gap width)이내가 될 때 그 최소거리를 가지는 공구와 가공물의 각 구성요소를 방전점으로 정의한다. 방전간극은 절연액의 종류와 인가 전압에 따라 결정되는 요소이며, 시뮬레이션에서는 실험값을 적용한다. 또한, 공구와 가공물의 각 구성요소간의 최소거리를 통해 공구와 가공물의 단락여부를 판단하게 되는데, 그 거리가 0 이하에서는 단락으로 간주하여 공구를 반대방향으로 이송시킨다. 최소거리가 방전간극보다 크면 스파크는 발생하지 않으며, 같은 최소값을 가지는 여러 쌍의 방전점이 있을 경우에는 단수 발생을 통하여 임의로 방전점을 결정한다.

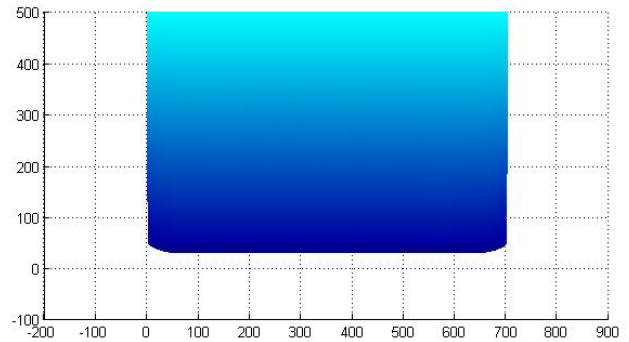
방전점의 위치가 결정되면 그 위치에서 재료의 제거가 일어난다. 이는 공구와 가공물 각각에서 크레이터를 생성 시킴으로써 이루어진다. 공구와 공작물의 물질, 절연액의 종류, 스파크 유지시간은 한 번의 스파크 발생시 생성되는 공구와 공작물에서의 크레이터 형상과 공구마모비(tool wear ratio)를 결정한다. 본 시뮬레이션에서는 주어진 조건에서의 공작물의 크레이터 부피와 공구마모비를 실험을 통해 측정하여 적용한다. 공구 표면에 생성되는 크레이터의 부피는 공작물의 크레이터 부피와 공구마모비의 곱으로 결정된다. 시뮬레이션에서의 크레이터의 형상은 반원으로 가정하며, 방전점에서 가까운 요소들을 정해진 부피만큼 차례로 제거해나감으로써 반원 형상의 크레이터를 생성한다.

3. 시뮬레이션 결과

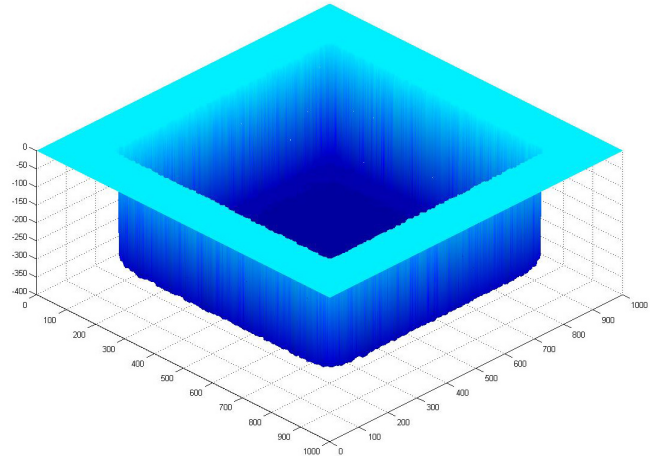
시뮬레이션의 신뢰성을 확인하기 위하여 간단한 모양의 공구를 사용하는 미세 형조방전가공에서의 공구마모 형상과 공작물의 가공형상을 시뮬레이션을 통해 예측해 보았다. 공구는 한 번의 길이가 700 μm 인 정사각형 단면을 가지는 사각기둥 모양으로 형상화하였고, 이 공구를 평평한 시편으로부터 15 μm 위에서 수직방향 아래로 365 μm 깊이만큼 이송시켜 가공하였다. 시뮬레이션 인자는 table 1 과 같으며, 이는 특정조건하에서의 실제 방전가공의 조건으로 도출된 값이다. Fig. 2 은 위와 같은 조건에서 공구와 공작물에 대한 시뮬레이션 결과이다. Fig. 2(a)에서 축방향 공구마모 길이는 약 30 μm 이다. 실제 형조방전 가공에서는 공구의 모서리 부분이 더 많은 양의 가공물 재료를 제거하기 때문에 모서리 부분이 항상 둥글게 마모되는 경향을 보인다. 시뮬레이션으로 예측된 공구의 모서리 부분 역시 이러한 경향을 보이며 마모되는 것을 알 수 있다. 또한, 공작물의 가공된 깊이는 공구의 축방향 마모로 인해 가공물 표면으로부터의 절입깊이인 350 μm 보다 작은 약 340 μm 이며, 둥글게 마모되는 공구의 영향으로 인해 가공된 사각포켓 형상의 아래 모서리 부분 역시 둥글게 마모되었음을 Fig. 2(b)를 통해 확인할 수 있다. 위의 결과를 통해 미세 형조방전가공 시뮬레이션은 공구의 마모형상과 공작물의 가공형상을 실제와 유사하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Table 1 Simulation parameters

Parameters	Unit	Value
Mesh size	μm	2
Tool size	$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$	700 \times 700
Sparking gap width	μm	15
Simulation time step	μsec	100
Workpiece crater volume	μm^3	231
Volumetric tool wear ratio	-	0.089
Machining depths	μm	350
Feedrate	$\mu\text{m/s}$	3.967



(a) Simulated tool



(b) Simulated workpiece

Fig. 2 Simulated tool and workpiece geometries

4. 결론

본 연구에서는 미세 형조방전 가공에서의 공구의 마모와 가공물의 가공형상을 예측하는 기하학적 시뮬레이션 모델을 제안하였다. 이 모델은 3 차원 기하학적 모델, 방전점 결정 모델, 재료제거 모델로 나누어져 실제 형조방전가공을 모사한다. 또한, 실제 가공공정의 다양한 가공인자를 단순화된 시뮬레이션 인자인 단발방전시 크레이터 부피, 공구마모비, 방전간극, 방전 빈도수 등으로 재정의하여 적용하였으며, Z-map 알고리즘을 사용하여 공구마모 형상과 가공물의 형상을 3 차원으로 예측한다. 시뮬레이션 결과는 방전가공에서의 공구 마모 양상을 잘 보이고 있으며, 이로 인한 가공물의 형상 역시 예측할 수 있음을 보였다. 개발된 시뮬레이션은 미세 형조방전 가공에서 공구의 마모를 보정하여 원하는 가공 형상을 얻을 수 있는 급형의 형상 설계에 활용됨으로써 가공품질 향상에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 지식경제부 전략기술개발사업인 “대면적 미세형상 가공시스템 개발” 과제의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Tricarico, C., Delpretti, R. and Dauw, D. F., "Geometrical simulation of the EDM die-sinking process," Annals of the CIRP, **37**, 191-196, 1988.
2. Kunieda, M. and Kiyohara, M., "Simulation of die-sinking EDM by discharge location searching algorithm," International Journal of Electrical Machining, **3**, 79-85, 1998.
3. Zhao, Y., Zhang, X., Liu, X. and Yamazaki, K., "Geometric modeling of the linear motor driven electrical discharge machining (EDM) die-sinking process," International Journal of Machine Tools and Manufacture, **44**, 1-9, 2004.