

미세 방전가공에서의 열영향층 예측

김태곤*, 민병권, 이상조(연세대 기계공학부)

Prediction of the Heat-Affected Zone in the Micro Electric Discharge Machining

T. G. Kim, B.-K. Min, S.-J. Lee

(School of Mechanical Engineering, Yonsei University)

ABSTRACT

This study predicts the heat-affected zone (HAZ) after electrical discharge machining. To predict HAZ, the temperature distribution is calculated using FEM. Heat flux is calculated from electrical energy, and it can be assumed Gaussian distribution. Plasma channel expands as time goes. Copper and NAK80 are used as the workpiece material. The depth of HAZ in simulation is determined by temperature distribution. The simulation results were compared with a developed actual single discharge crater. Through investigating the cross section of simulated & actual craters, the depth of HAZ in simulation and experiment are compared. Simulation model can predict the crater shape.

Key Words : Electrical discharge machining (방전가공), FEM (유한요소법), Heat-affected zone (열영향층), Simulation(시뮬레이션)

1. 서론

방전가공은 두 전극 사이에 절연과피가 일어날 때 발생하는 방전 플라즈마를 이용하는 가공방법이다. 방전가공은 전도성을 가진 금속을 높은 중형비를 가지도록 가공할 수 있는 장점이 있고, 플라즈마를 이용하기 때문에 미세 정밀 가공에 응용될 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 현재 방전가공은 정밀 금형 가공을 포함한 정밀가공 분야에서 적절한 방법 중 하나로 제안되고 있다.

방전 가공의 생산성 및 정밀도를 높이기 위해서는 방전 플라즈마의 전압, 전류, 크기, 압력 등 가공이 일어날 때 발생하는 플라즈마의 성질을 규명하여야 한다. 또한 전극과 공작물의 전기적 성질, 물리적 성질, 절연액의 전기적 성질 등 많은 요소들을 측정해야 한다. 그러나 방전이 일어나는 시간이 μsec 레벨의 짧은 시간이고 플라즈마의 크기 역시 μm 레벨로 작기 때문에 실제 방전가공에서는 위의 요소들을 측정하는데 있어 많은 어려움이 있다. 따라서 방전가공에서 재료가 어떻게 제거되는지에 대한 명확한 이론은 아직 제시되지 않고 이에 대한 연구가 진행 중이다.

방전 가공의 모델링 및 해석과 관련한 연구는 이전부터 많이 진행되어왔다. 이러한 연구들은 대부분 플라즈마의 열원을 모델링한 것들이다. 초기에는 플라즈마의 열원을 디스크 형태의 반경이 일정한 열원으로 모델링하였고 최근에는 열원이 가우시안(Gaussian) 분포를 가지는 것으로 모델링하고 있다. 그러나 실제 방전 시 발생하는 플라즈마를 고속카메라로 찍어보면 플라즈마의 직경이 변하는 것을 관찰 할 수 있으므로 직경의 변화를 고려하여 모델링하는 것이 더욱 정확하다.

본 연구에서는 유한요소 패키지를 이용하여 단발 방전을 시뮬레이션 했고, 열원과 플라즈마를 모델링하였다. 열원은 가우시안 분포를 가지고, 플라즈마의 반경은 시간에 따라 팽창하는 모델을 세웠다. 시뮬레이션을 검증하기 위해 단발방전을 일으키고 단발방전 결과 생긴 크레이터의 단면을 관찰하여 열영향층의 두께를 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

2. 방전 메커니즘 모델링

방전 가공은 고온 고압의 플라즈마에 의해 재료

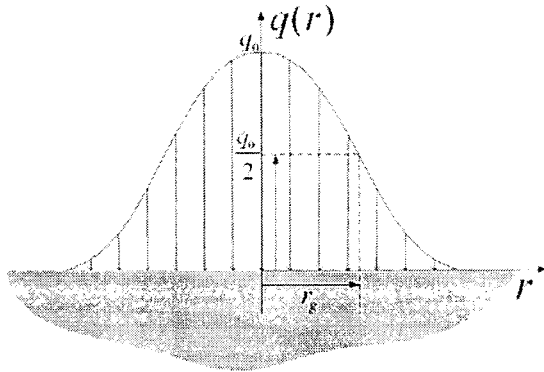


Fig. 1 Heat flux with Gaussian distribution considering expanding plasma channel radius.

를 가공하는 방법이다. 플라즈마의 높은 온도에 의해 재료가 용융되고, 높은 압력에 의해 재료의 용융부가 변형되어 가공 표면을 형성하게 된다. 실제 가공을 할 때에는 열과 압력이 동시에 재료에 가해진다. 그러나 압력은 온도 변화에 영향을 주지 않고, 짧은 순간에 일어나기 때문에 방전 가공 공정은 열원에 의한 가열과 압력에 의한 변형으로 모델링될 수 있다. 열영향층은 열원에 의한 온도 분포만을 고려하여 예측할 수 있으므로 열원과 플라즈마 모델을 이용하여 온도분포를 계산하였다.

2.1 가정

방전 가공 공정은 많은 변수를 가지고 있고, 측정하기 어렵기 때문에 다음과 같은 가정하에 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 우선 플라즈마는 축대칭모델이며, 가공물 재료의 물성치는 온도에 따라 변하지 않고 일정한 값을 가진다. 그리고 열과 압력은 서로 상호작용하지 않는다. 이와 같은 가정을 바탕으로 다음과 같이 열원과 플라즈마 모델을 세울 수 있다.

2.2 열원 모델링 [2]

플라즈마의 에너지는 열유속의 형태로 공작물에 전달된다. 그리고 이것은 Fig. 1 과 같이 가우시안 분포를 가지고 있다. 이것의 최대 세기를 q_0 라고 하고 플라즈마의 반경을 r_g 라고 하면 중심에서의 거리 r 에서의 세기 $q(r)$ 는 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$q(r) = q_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{r_g}\right)^2\right) \quad (1)$$

여기서 열유속의 최대 세기 q_0 는 전극과 공작물 사이의 전압과 플라즈마가 발생할 때의 전류를 이용하여 계산할 수 있다. 열유속은 단위면적당 전기

Table 1. Material properties of workpiece.

Properties	Copper NAK80	
Density [kg/m ³]	8,640	7,840
Thermal conductivity [W/mK]	367	40
Melting temp.[K]	1,365	1,800
Boiling temp.[K]	2,840	3,132
Latent heat of fusion [J/g]	213	274
Latent heat of evaporation [J/g]	4,800	7,121

에너지이므로 식 (1)은 식 (2)와 같이 모델링 할 수 있다.

$$q(r) = \frac{R_w IV}{\pi r_g^2} \exp\left(-2\left(\frac{r}{r_g}\right)^2\right) \quad (2)$$

여기서 R_w 는 플라즈마의 에너지 중 공작물에 흡수되는 에너지의 비율이고, I 는 플라즈마가 발생할 때의 전류, V 는 전극과 공작물 사이의 전위차이다

2.3 플라즈마 모델링

식 (2)에서 플라즈마의 반경은 공작물에 흡수되는 열유속을 결정하는 데 중요한 역할을 한다. 같은 에너지를 가지고 있더라도 플라즈마 반경에 따라 열유속이 달라지기 때문이다. 플라즈마 채널의 반경은 실제 방전 가공을 하면서 측정되어야 하지만, 짧은 시간에 작은 크기로 발생하기 때문에 측정이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 플라즈마가 발생하는 동안의 전류의 변화를 이용하여 플라즈마 모델을 세웠다. 플라즈마가 발생할 때 전류의 파형은 일정시간까지는 증가하다가 감소한다. 전류가 증가하는 때와 감소하는 때의 플라즈마 반경의 팽창이 다르다고 가정하면 플라즈마의 반경은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

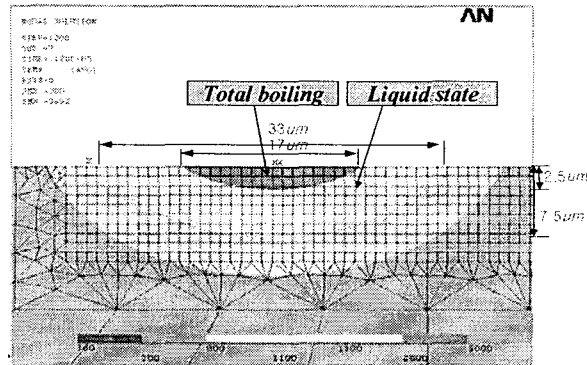
$$r_g(t) = \begin{cases} a+bt, & 0 \leq t \leq t_a \\ r_g(t_a)+c(t-t_a), & t_a \leq t \leq t_{om} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $r_g(t)$ 는 시간 t 에서의 플라즈마의 반경이고, t_a 와 t_{om} 은 각각 플라즈마 반경이 팽창하는 시간, 플라즈마가 존재하는 시간이다. a, b, c 는 시뮬레이션과 계산을 반복하며 구하는 상수이다.

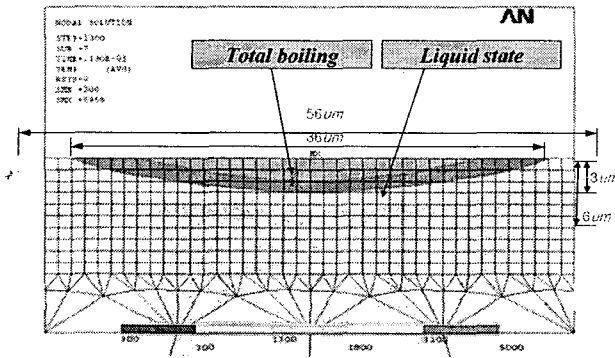
3. 시뮬레이션 및 결과

3.1 시뮬레이션

시뮬레이션은 ANSYS 를 이용해서 공작물에 열원 모델을 입력하여 온도 분포를 구하는 것으로 진



(a) Workpiece: copper



(b) Workpiece: NAK80

Fig. 2 Simulation result for temperature distribution according to workpiece material.

행하였다. 재료의 물성치는 Table 1 과 같다. 재료의 물성치는 온도에 따라 다르지만 빠른 시간 내에 온도가 급속히 변하기 때문에 온도에 따른 재료의 물성치는 일정하다고 가정하였다. 재료가 증발되어 제거되기 때문에 재료의 상변화에 따른 잠열까지 고려하여 온도분포를 구하였다.

3.2 시뮬레이션 결과

열원 모델을 바탕으로 열유속을 공작물인 구리와 NAK80 에 입력했을 때 시뮬레이션 된 시간에 따른 온도분포는 Fig. 2 와 같다. 각각의 끓는점과 녹는점을 구분하여 공작물이 증발된 부분, 용융된 부분으로 구분하여 그 때의 깊이를 측정하였다. 그 결과 구리의 용융부는 직경이 약 $33\ \mu\text{m}$ 이며, 깊이는 약 $7.5\ \mu\text{m}$ 이었다 그리고 NAK80 의 경우 용융부의 직경은 약 $56\ \mu\text{m}$ 이며, 깊이는 약 $6\ \mu\text{m}$ 이다.

4. 실험 및 고찰

시뮬레이션의 결과를 검증하기 위해서 시뮬레이션과 동일한 조건, 동일한 재료에 대해 실제 방전

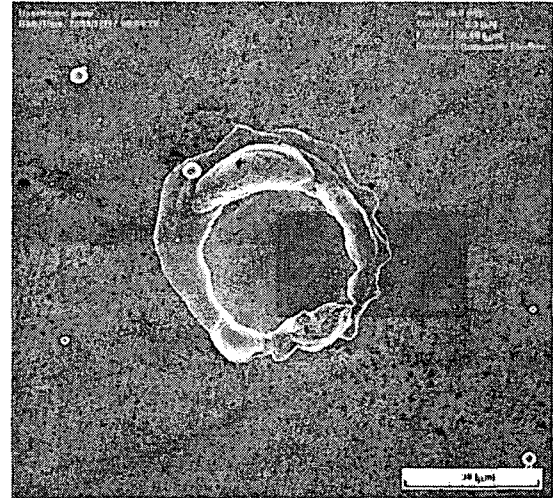


Fig. 3 FIB image of single discharge crater.

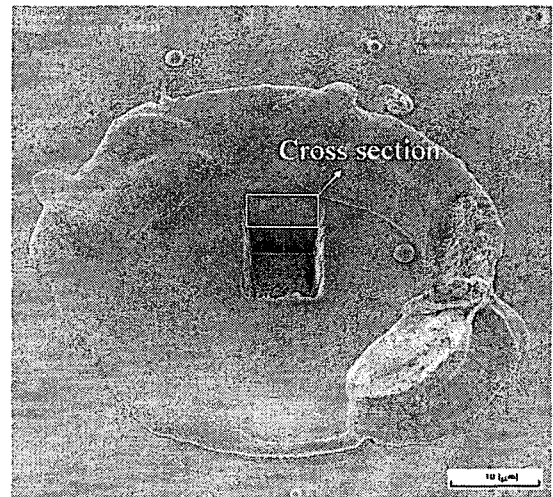
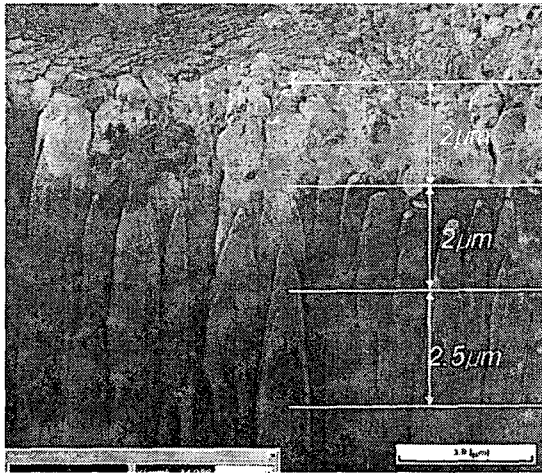


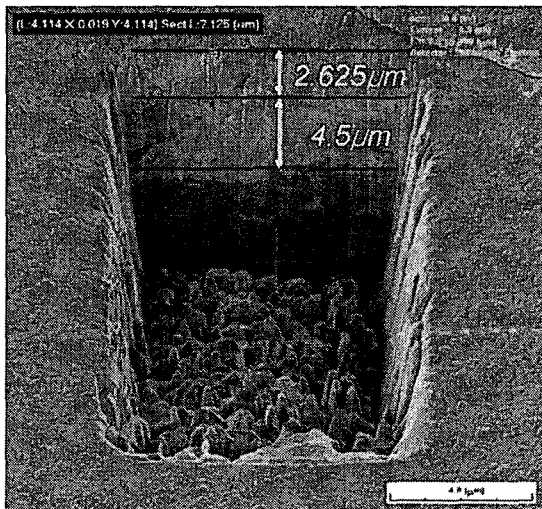
Fig. 4 FIB image of cross section in crater.

실험을 수행하였다. 시뮬레이션에서 방전이 한번 일어나는 단발 방전 모델을 사용했으므로 실험에서도 단발 방전을 일어나도록 하였다. 단발 방전을 일으키기 위해 직경 $150\ \mu\text{m}$ 의 텅스텐 전극을 에칭하여 탐침을 만든 후 방전을 일으켰다. 단발 방전 후 생성된 크레이터를 FIB(Focused Ion Beam)로 측정 한 결과는 Fig. 3 과 같다.

가공 후 공작물에 남은 열영향층을 확인하기 위해서 Fig. 4 와 같이 단면을 볼 수 있도록 FIB 를 이용하여 크레이터를 절단가공하였다. 열영향층은 온도에 따라 급속을 구성하는 원자들간의 결합이 달라지기 때문에 FIB 로 관찰하면 명암차에 의해 구분될 수 있다. 단면을 보기 위해 FIB 를 이용하여 단면을 절단한 후 FIB 로 관찰하여 용융된 후 다시



(a) Workpiece: copper



(b) Workpiece: NAK80

Fig. 5 Investigation of HAZ depth in single discharge crater according to workpiece material.

응고된 재결정층 및 열영향층을 측정할 수 있다.

방전 플라즈마가 생긴 뒤 재료의 끓는 점을 넘은 부분은 증발되어 제거되고, 용융부는 플라즈마의 압력에 의해 옆으로 밀려나가 크레이터를 형성하게 된다. 밀려나가고 남은 용융부의 두께는 FIB으로 단면을 관찰하였을 때 Fig. 4에서 표시된 사각형 내의 밝게 나오는 부분이다. 용융부의 깊이를 측정하면 Fig. 5와 같다. 시뮬레이션에서 용융부의 두께는 시뮬레이션 상에서의 용융부의 깊이에서 크레이터의 깊이를 제외시키면 얻을 수 있다. 구리와 NAK80의 크레이터의 깊이는 각각 $5\ \mu\text{m}$, $3.5\ \mu\text{m}$ 였다. 따라서 Fig. 2의 시뮬레이션 결과와 비교하여 용융층의 두께를 계산하면 구리와 NAK80의 경우

각각 $2.5\ \mu\text{m}$, $2.5\ \mu\text{m}$ 가 나온다. 실험 결과 측정된 용융층의 두께는 각각 $2\ \mu\text{m}$, $2.6\ \mu\text{m}$ 로 시뮬레이션과 비슷한 결과를 보여주었다.

5. 결론

방전가공은 플라즈마의 열을 이용하여 재료를 가공하는 방법이다. 따라서 가공 후에는 재료 표면에 열영향층이 생기게 되고 이것은 재료의 물성을 변화시키게 된다. 본 연구에서는 실제 열영향층을 알아보기 위해서는 재료의 단면을 관찰하여야 하지만 제시한 시뮬레이션 모델을 이용하여 열영향층을 미리 예측할 수 있음을 보였다.

가우시안 분포를 가지는 열원 모델과 시간에 따라 팽창하는 플라즈마 채널 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 검증을 위하여 실제 단발 방전을 일으켜서 크레이터 내부의 용융층의 두께와 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 용융층의 두께는 구리와 NAK80의 경우 각각 $2.5\ \mu\text{m}$, $2.5\ \mu\text{m}$ 이었고, 측정결과는 각각 $2\ \mu\text{m}$, $2.6\ \mu\text{m}$ 이었다. 방전 가공을 한 후 재료 단면의 열영향층을 측정하여 시뮬레이션과 비교함으로써 시뮬레이션의 신뢰성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 산업기술기반 조성사업 중 마이크로 나노 점·선 가공기반 구축 사업단의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, D.-K., Electrical Discharge Machining Mechanism Analysis and Simulation using Finite Element Method, Ph. D. Thesis, Yonsei University, 2004.
2. Yadav, V., Jain, V. K., Dixit, P. M., "Thermal stress due to electrical discharge machining," *Int. J. of Machine Tool & Manufacture*, Vol.42, pp.877-888, 2002.
3. Schumacher, B. M., "After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed," *J. of Material Processing Technology*, Vol.149, pp.376-381, 2004.
4. Das, S., Klotz, M., and Klocke, F., "EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses," *J. of Material Processing Technology*, Vol.142/2, pp. 434-451, 2003.