

전해액 초음파 진동을 이용한 전해방전가공의 가공 깊이 향상 Improvement of Machining Depth using Ultrasonic-assisted Electro-Chemical Discharge Machining

*무하마드 아잠, 한민섭, #민병권, 이상조
M. Azam, M.-S. Han, #B.-K. Min (bkmin@yonsei.ac.kr), S. J. Lee
연세대학교 기계공학부

Key words : Ultrasonic vibration, Side-insulated electrode, Glass machining

1. 서론

전해방전가공(ECDM: Electro-Chemical Discharge Machining)은 전해작용으로 생성된 기체 절연막(gas film)에 의해 발생하는 스파크 방전(spark discharge)의 열에너지를 이용한 특수가공법 중의 하나이다. 이러한 방전 현상은 가공물의 전기적 특성과 무관하게 발생 가능하기 때문에 유리나 세라믹과 같은 비전도체의 미세 구멍 또는 미세 채널 가공에 적용 가능하다.¹ 또한 가공 중 전극 마모 보상이 요구되지 않는 장점이 있어 최근 높은 정밀도의 3차원 유리 미세 구조물 가공에 성공한 연구도 보고된 바 있다.² 전해방전가공의 형상 정밀도 및 표면 품질과 같은 가공 품질(machining quality)의 향상을 위해서는 보다 안정적인 기체 절연막의 형성이 요구된다. 이를 위해 Wüthrich et al 은 전해액에 계면활성제를 첨가하여 절연막 두께를 감소시켰으며 Han et al 은 측면 절연전극을 이용하여 전해작용을 전극 끝부분에 집중시켜 균일한 형상의 절연막 형상을 유도하였다.^{3, 4}

일반적으로 전해방전가공을 이용한 미세 구멍 가공의 경우 가공이 진행됨에 따라 스파크 발생 빈도가 급격하게 떨어지는 현상이 발생한다. 이는 가공 깊이가 깊어질수록 전극과 가공물 간극에 전해액 공급이 원활하게 이루어지지 않기 때문이다. 이러한 현상은 전해작용을 방해하고 전극의 저항열을 급격히 증가시켜 가공물에 심각한 열변형을 가져올 뿐만 아니라 스파크 발생이 구멍 입구에 집중되어 과도한 테이퍼(taper) 및 오버컷(overcut) 현상을 통해 형상 정밀도의 저하를 일으킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전극의 옆면을 평평하게 가공하거나 전극 직경에 단차를 주는 등 전해액의 원활한 순환을 위한 공간 확보를 목적으로 다양한 전극 형상들이 제시된 바 있다.⁵ 본 논문에서는 전해액 내의 초음파 진동을 이용하여 가공 간극에서의 전해액의 신속한 공급 및 순환 활성화를 통하여 지속적인 스파크 발생을 유도하였다. 또한 구멍 가공이 진행됨에 따라 전해액과 접촉하고 있는 전극의 표면적(active tool surface)이 증가 또는 감소하는 현상을 방지하기 위해 측면 절연전극을 사용하여 전해작용으로 생성되는 기체의 양을 일정하게 유지시켜 스파크 에너지의 안정화를 유도하였다.

2. 실험조건 및 결과

그림 1에서 본 연구에서 사용된 미세구멍 가공 실험 장치의 개략도를 보여주고 있다. 가공물과 일정 간격을 유지한 직경 30 mm의 원형 초음파 진동자를 200 Hz의 주파수로 전해액 내에서 가진 하였다. 전극은 직경 0.2 mm의 텅스텐 전극을 사용하였으며 세라믹 튜브를 이용하여 전극의 측면을 절연하였다. 전해액으로는 20 wt % 농도의 NaOH를 사용하였으며 입력전압은 펄스형태로 35 DCV를 걸어주었다. 일반적으로 전해방전가공에서는 정류 DC 전압을 주로 사용해 왔으나 펄스 전압을 사용할 경우 주기적인 voltage off time을 줌으로써 정류 전압을 사용했을 때 발생하는 가공물의 지속적인 열 변형을 억제하는 효과를 얻을 수 있다.

또한 펄스 주파수가 증가할수록 재료 제거율은 감소하기 때문에 높은 재료 제거율과 충분한 기체 절연막 형성 시간(gas film build-up time)을 고려하여 50Hz의 낮은 주파수에서 미세 구멍 가공을 실시하였다.² 표 1은 주요 실험 조건을 나타낸 것이다.

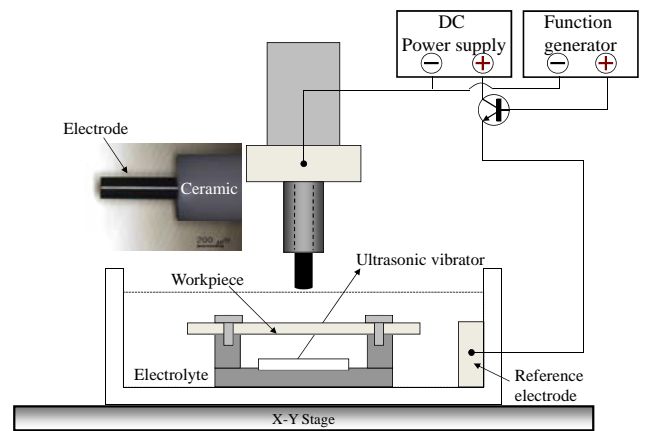


Figure 1 Experimental setup of micro-ECDM process

Table 1 Experimental conditions

Variables	Description
Electrolyte	20 wt % NaOH
Tool electrode	Tungsten (dia.: 0.2 mm)
Ultrasonic vibrator	Dia.: 30 mm disk type, frequency: 200 Hz
Applied voltage	35 DC pulse (frequency: 50 Hz, duty: 50 %)
Workpiece	borosilicate glass (thickness: 1mm)
Machine tool accuracy	Axes resolution: 1µm

그림 2은 정류 전압 하에서 일반 전극과 절연 전극을 사용하여 미세 구멍 가공을 실행한 결과를 비교하고 있다. 일반 전극을 사용한 기존의 전해방전가공의 경우 기체 절연막 형상의 불균일성으로 인하여 전극 표면에서의 발생되는 스파크의 위치나 에너지 크기가 매우 불규칙적이기 때문에 미세 구멍 가공 시 과도한 테이퍼 및 오버컷 현상뿐만 아니라 구멍 형상의 진원도에도 악영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 절연막의 안정적인 균일한 형성을 위한 방법으로 측면 절연 전극을 제시하였다. 절연전극을 적용한 결과 전해액 표면에서 발생하는 난잡한 전해작용(stray electrolysis)을 제거하고 실제 가공이 일어나는 전극 끝부분에 전해작용을 국소화(localization)시킬 수 있었다. 그 결과 전기화학적으로 발생하는 대부분의 기체방울들을 효과적으로 결합시켜 구형의 단일 기체 절연막 형성(spherical single bubble formation)를 통해 기하학적으로 균일한 절연막 형상을 얻을 수 있다. 절연전극 사용시 생성되는 기체 절연막의 기하학적 모델 및 실제 스파크 발생 현상을 그림 3에서 보여주고 있다. 이러한 절연막의 기하학적 특성은 전극 측면의 스파크 발생을 억제하고 전극 밑면 모서리에서

보다 활성화 되고 있음을 볼 수 있다. 또한 입력 펄스 전압의 주파수 및 듀티비를 적절하게 조절함으로써 절연막의 형상을 원형 또는 타원형으로 조절 가능하다. 이러한 현상을 통해 그림 2(b)에서 보이는 바와 같이 미세 구멍 가공에서 전극 측면 방전을 억제하여 테이퍼 및 오버컷 감소 효과를 가져다 준다. 그러나 가공 깊이가 약 400 μm 이상 증가함에 따라 가공 간극으로의 전해액 공급과 순환이 난해해짐에 따라 가공속도 및 스파크 발생 주기가 급속하게 감소하면서 가공이 중단되었다. 전해방전 가공에서 가공물의 세장비(aspect ratio) 향상을 위해서는 이러한 전해액 공급 문제를 해결해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 전해액의 흐름과 진동을 통해 좁은 가공 간극에서 보다 신속한 전해액의 재순환을 유도하였다. 사용한 초음파 진동자는 30 mm 직경의 원형 진동자로 200 Hz의 주파수로 진동하였다. 또한 펄스 타입의 직류 전압을 사용하여 가공물 표면에 지속적인 스파크 열에너지 주입으로 인한 열 변형의 증가를 억제하고자 하였다.

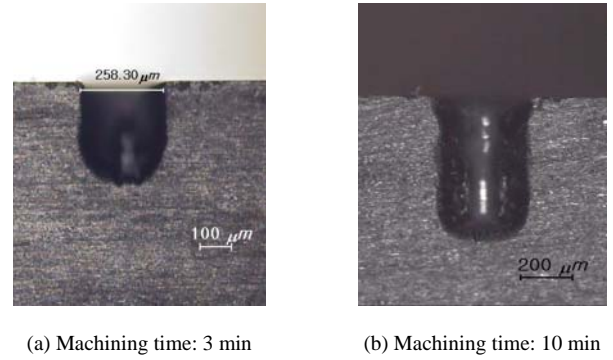


Figure 4. Geometry of machined hole using ultrasonic assistance, DC pulse voltage and side-insulated electrode

그림 4는 초음파 진동, 펄스 전압 그리고 절연전극을 적용한 미세 구멍 가공 결과를 보여준다. 전해액 내에 초음파 진동을 적용한 결과, 가공 깊이를 약 2 배 가량 향상시킬 수 있었다. 또한 절연 전극의 사용은 국소화된 전해 작용을 통해 스파크 에너지의 균일성을 향상시켜 미세 구멍의 테이퍼 및 오버컷을 효과적으로 줄여 가공물의 형상 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 전해방전 가공의 가공 깊이 향상을 위해 전해액의 흐름과 진동, 측면 절연 전극 그리고 펄스 전압을 사용하였다. 유리의 미세구멍 가공 실험을 통해 각각의 효과를 검증하였다. 초음파를 적용한 결과 가공 간극에서의 전해액 순환이 강화되어 가공이 진행됨에 따라 지속적인 스파크 발생이 유지되어 가공 깊이를 약 2 배 이상 향상시킬 수 있었다. 또한 측면 절연 전극을 사용하여 가공된 구멍의 형상 정밀도를 향상시켰다. 펄스 전압을 적용한 결과 정류 전압의 경우보다 오버컷과 테이퍼 현상을 더 낮출 수 있었다. 이는 펄스 전압의 주기적인 off time 동안 가공물의 냉각효과(cool effect)를 통하여 열 변형층(Heat affected zone)을 감소시킬 수 있기 때문이다.

참고문헌

1. Wüthrich, R., and Fascio, V., "Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon—an overview," *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **37** 1095–1108, 2005.
2. Zheng Z.P., Cheng W.H., and Huang F.Y., "3D microstructuring of Pyrex glass using the electrochemical discharge machining process," *J. Micromech. Microeng.* **17** 960-966, 2007.
3. Wüthrich, R., and Hof, L.A., "Physical principles and miniaturization of spark-assisted chemical engraving (SACE)," *J. Micromech. Microeng.* **15** 268–275, 2005.
4. Han, M.-S., Min, B.-K., and Lee, S. J., "Modeling gas film formation in electrochemical discharge machining processes using a side-insulated electrode," *J. Micromech. Microeng.* **18**, 045019, 2008.
5. Zheng Z.P., Su H.C., Huang F.Y. and Yan B.H., "The tool geometrical shape and pulse-off time of pulse voltage effects in a Pyrex glass electrochemical discharge microdrilling process," *J. Micromech. Microeng.* **17** 265-272, 2007.



Fig. 2 Cross-section of machined hole using (a) conventional and (b) side insulated electrode at 35 DC rectified voltage and 20 wt % NaOH solution

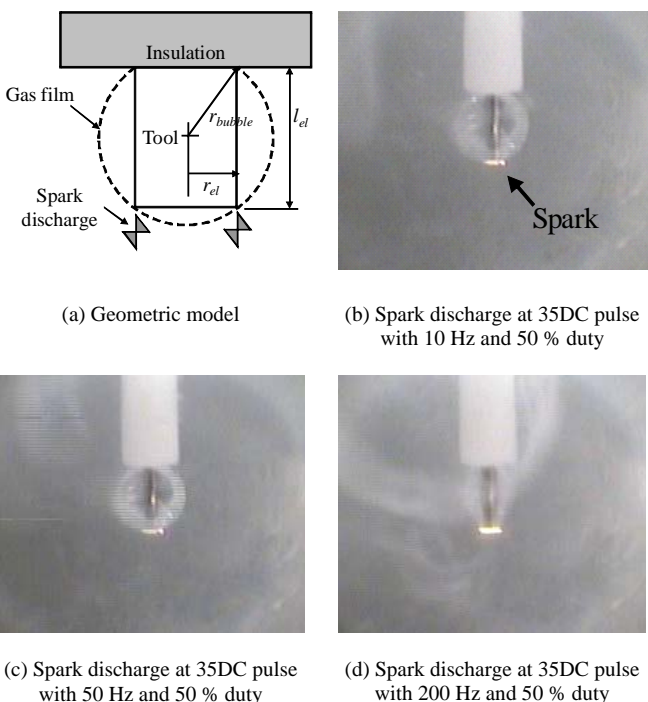


Figure 3. Geometry of gas film using a side-insulated electrode