

전압 주파수와 파형 폭 변화에 따른 유리의 미세 전해 방전 가공 성능에 대한 실험

이정용*, 안유민**, 안시홍***, 박치현***, 김용권***

* 한양대학교 정밀기계공학과 '대학원', ** 한양대학교 기계공학과, *** 서울대학교 전기공학부

The Experiment on the effect of variations of voltage frequency and duty ratio on the electrochemical discharge machining of pyrex glass

Lee Jungyong*, Ahn Yoomin**, Ahn Sihong***, Park Chihyun***, Kim Yongkweon***

* Dept. of Precision Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University

** Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang University

*** School of Electrical Engineering, Seoul National University

Keywords : Electrochemical Discharge Machining, Pyrex Glass, Voltage Frequency, Duty Ratio

Abstract - Electrochemical discharge machining (ECDM) is a very recent technique in the fabrication of the micro-electro-mechanical system (MEMS) devices. This paper presents the experimental results of the machining of micro-holes on pyrex glass substrates by use of ECDM. Electrolyte is used with a KOH aqueous solution, cathode with copper, anode with platinum, and tool feed system is applied with gravity feed system. Already established experimental results were taken under the condition of constant voltage frequency. However in this paper, the effect of variation of the voltage frequency and duty ratio is considered. In this experiment, it is measured the ECDM performances with variation of the voltage frequency and duty ratio under the conditions of constant other machining variables. ECDM performances are described by the hole depth, and the top hole diameter.

1. 서 론

현재 MEMS 분야에서는 파이렉스 유리를 이용한 미소 구조물 제작이 활발히 진행되어지고 있다. 파이렉스 유리는 실리콘 웨이퍼에 접합하여 다양한 미소 구조물의 제작에 사용되어지고 있다[1].

기존의 미세 가공 방법으로는 유리같이 취성이 강한 재료에 적용하는 데 어려운 점이 많으며, 취성이 강한 재료에도 적용 가능한 전기 방전 가공 (Electrical discharge machining : EDM)은 부도체인 경우에는 부적합하였다. 따라서 유리, 복합 재료 등의 가공에는 전해 방전 가공 (Electrochemical discharge machining : ECDM)이 최근에 연구되어지고 있다.

전해 방전 가공은 종전에 도체에 적용되었던 전해 가공 (Electrochemical machining : ECM)에서 특정한 상태 아래에서 방전이 일어나는 현상을 이용하여, 역시 도체에 적용되었던 전기 방전 가공의 기술을 결합시킨 방법이다. 즉, 저전압에서 행하여지던 전해 가공의 전압을 높여 좀으로써 방전이 일어날 조건을 만들어주는 것이다. 기존의 전해 가공에서는 이러한 방전이 표면에 결합을 주는 것으로 피해져왔으나 유리와 같은 부도체의 가공이 연구되어짐에 따라 방전에 의한 열에너지를 이용하는 방법으로 전해 방전 가공이 제안되었다[2].

종전의 연구는 사용 주파수가 일정하지 못하여 가공에 따른 결과 수치를 정확히 제시하지 못하였다[3-9]. 전해 방전 가공에서는 방전이 끊임없이 일어나는 것이 아니라 전압이 일정 값 이상일 때 방전이 일어나는 만큼 방전

주기와 인가전압 유지시간이 중요하다.

이 논문에서는 전해 방전 가공의 전압 주파수와 파형 폭 변화에 따른 가공 성능의 실험적 연구로서 가공 성능으로는 상부 가공 직경의 폭, 가공 깊이를 나타내었다.

2. 전해 방전가공 (ECDM)

전해 방전 가공이란 수소 이온을 포함하는 수용액에 전류를 흘려주어, 방전에 의한 열에너지를 이용하여 대상물을 가공하는 것을 말한다. 그럼 1은 전해 방전 가공, 전기 방전 가공, 전해 가공의 차이를 도식적으로 나타낸 것이다.

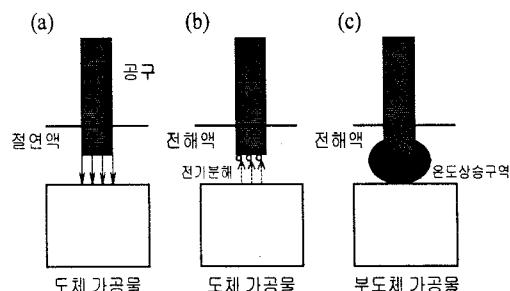


그림 1. 여러 가공 현상의 비교 (a) 전기 방전 가공 (b) 전해 가공 (c) 전해 방전 가공

전기 방전 가공과 전해 가공은 가공물이 도체인 경우에 적용되므로 유리 재료에는 부적합하다. 전해 방전 가공이 도체인 가공물로 방전이 일어나는데 비해 전해 방전 가공은 수용액으로 방전이 일어난다. 즉 가공물로 직접 방전이 일어나는 것이 아니라 수용액으로 방전이 일어난 후 발생하는 열에너지가 수용액의 온도를 높인다. 이 때 가공물이 수용액의 열 구역 안에 있으면 녹는 현상으로 인하여 가공이 일어난다. 즉 온도 상승을 이용하여 가공물을 녹이는 것이므로 부도체인 경우에도 가공이 가능하다.

전해 방전가공의 가공기구는 아직 정화하지는 않으나, Basak 등에 의하면 공구로 쓰이는 음전극에 전류가 흐르면 전압이 일정 값보다 낮을 때에는 수용액에도 전류가 흐름에 따라 전기 분해 반응으로서 수소 가스는 공구 전극 주위에 발생한다. 이 수소 가스는 일종의 절연체의 역할을 하여 전류의 흐름을 방해하고, 절연으로 인하여 공구 표면의 전류 밀도가 증가하며, 전류 밀도의 증가로 인한 저항열에 의해 수증기를 발생시킴에 따라 음전극

표면을 공기 방울이 침쌀 때, 전압이 어느 값 이상에 도달하면 전류 밀도가 가장 높은 곳에서부터 수용액으로 방전이 일어난다[5]. 공구로서 원통형 전극을 사용할 때, 일반적으로 전극의 모서리 부분에서 전류밀도가 가장 크며 이 부분에서 가장 먼저 방전이 일어난다[6].

전해 방전가공의 장점은 유리나 복합물 같은 부도체에도 적용이 가능할 뿐만 아니라 음전극의 직경과 전압의 크기, 수용액의 농도 등을 조절함으로써 미소 구조의 형상을 가공할 수 있고, 고전압에서 작동되는 전기 방전가공과는 달리 낮은 전압으로도 방전이 용이하게 일어난다는 것이다.

3. 전해 방전가공 실험 및 결과

본 실험에서 사용된 실험 장치의 개략도를 그림 2에 나타내었다. ①은 수용액 육조, ②는 공구 홀더, ③은 백금 전극, ④는 수직 하중 조절 기구, ⑤는 구리 전극이 달린 하중체, ⑥은 유리 가공물을 나타낸다.

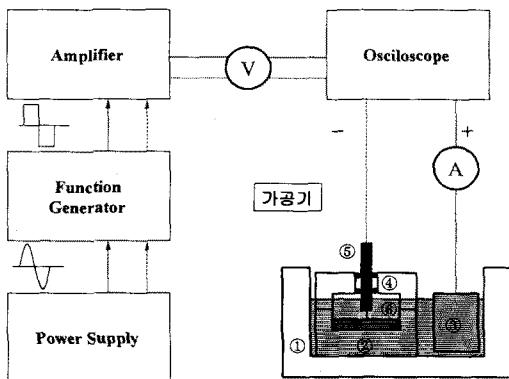


그림 2. 실험 장치도

이 실험에서는 다음과 같은 조건으로 유리를 가공하였다. 수용액으로는 일반적으로 KOH 수용액이나 NaOH 수용액을 사용한다. NaCl 수용액과 KCl 수용액은 가공율이 저조한 것으로 알려져 있다[6]. 이 실험에서는 KOH 수용액을 사용하였다. 수용액의 농도는 방전 강도에 비례한다. 따라서 방전 강도가 너무 강할 경우 표면 상태가 약호화되거나 물질이 손상될 수 있으므로 본 실험에서는 농도 25%의 수용액을 사용하였다.

전압 파형은 파형 발생기를 이용하여 사각파를 사용하였으며, 인가 전압은 40V를 일정하게 사용하였다. 인가 전압은 방전 강도에 영향을 미친다. 인가 전압이 일정한 값 이상일 때부터는 전압 크기와 비례하여 증가한다. 인가 전압이 너무 클 경우 표면 상태를 악화시킨다.

공구는 음전극으로 사용한다. 음전극으로는 원통형 구리를 사용하였다. 공구의 직경은 250 μm이다. 전해 방전가공에서는 수용액 속에서 공구의 노출 면적이 작을수록 전류 밀도가 크기 때문에 방전이 잘 일어난다. 공구 표면이 노출된 수용액의 높이에 따라 방전의 강도가 다르며 일정하게 유지하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 실험에서는 오실로스코프에서 방전시 파형의 모양을 측정하여 방전의 강도를 조절하였다. 또 공구는 방전이 진행됨에 따라 마모되어 형상이 변하므로 적절한 시기에 교체해 주어야 한다. 그림 3은 가공전과 전압 주파수 100MHz에서 2분 가공한 후의 음전극 형상과 표면 상태를 SEM을 이용하여 나타낸 것이다. 모서리 부분에서 방전이 가장 많이 일어나 모서리 부분이 가장 많이 닳는 것을 확인할 수 있다. 방전 가공 후 공구의 끝은 무뎌지며 표면은 거칠어진다.

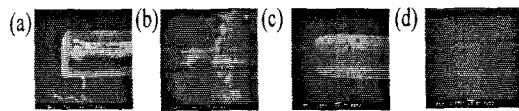


그림 3. 공구의 변형 (a) 가공 전 공구 형상 (b) 가공 전 공구 표면 상태 (c) 가공 후 공구 형상 (d) 가공 후 공구 표면 상태

양전극은 음전극과의 전기 음성도 차이가 충분히 커야 한다. 즉, 전류가 흐를 때 양전극에서 금속 양이온이 배출되도록 충분히 커야 한다. 여기서는 양전극으로는 백금을 사용하였다. 양전극은 방전이 일어남에 따라 오염이 된다. 가공물은 파이렉스 유리(Corning Co. #7740 pyrex glass)이고 두께는 500 μm이다. 공구 이송 방식은 하중에 의한 이송 방식이고 하중은 10g을 사용하였다. 공구 끝에 작용하는 압력은 약 2MPa이다.

일반적으로 사용되는 전압 주파수는 60Hz인데, 100MHz 이상의 주파수에서는 방전이 잘 일어나지 않는다. 인가 전압의 주파수는 1Hz, 100Hz, 그리고 10kHz에 대하여 실험하였다. 그리고 파형 폭은 100Hz에서 파형의 한 주기 시간에 대해 사각파의 전압이 40V인가되었을 때의 시간의 비를 나타내는 duty ratio를 25%, 50%, 그리고 75%로 하여 실험하였다.

그림 4는 duty ratio가 50%일 때 주파수별로 가공된 구멍의 상부 직경 폭을 나타내었다. 가공 시간이 지남에 따라 주파수에 상관없이 상부 직경은 커지며 가공시간 60초 이후부터는 주파수가 커질수록 상부직경은 작아진다. 이 결과는 주파수가 높아지면 방전은 자주 일어나지만 열에너지의 발생은 적다는 것을 의미한다. 또 가공시간이 지남에 따라 열에 의한 변형이 심해진다는 것을 알 수 있다.

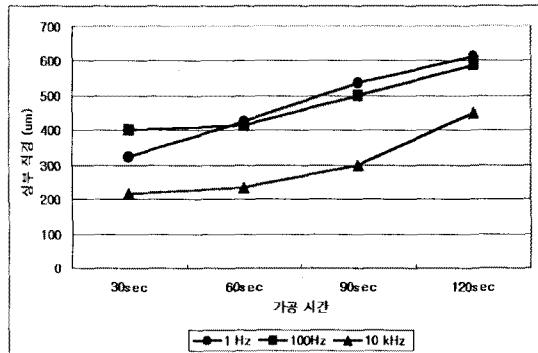


그림 4. 가공시간에 따른 주파수별 상부 구멍 직경

그림 5 duty ratio가 50%일 때 주파수에 따른 가공 깊이를 나타내었다. 30초 이상에서는 주파수가 낮을수록 가공 깊이가 더 깊다는 것을 알 수 있다. 그리고 가공시간이 경과됨에 따라 가공깊이도 거의 선형적으로 증가됨을 알 수 있다.

주파수가 높을수록 방전이 자주 일어나지만 가공되는 정도는 작다는 것을 알 수 있다. 주파수가 낮을수록, 즉 인가전압이 40V로 유지되는 시간이 길어질수록 방전에너지가 커져 가공에 이용되는 열에너지도 증가된다. 따라서 미세 구멍을 제작할 때는 높은 주파수에서 가공하는 것이 가공율은 낮지만 열변형이 적어져 바람직하다고 사료된다.

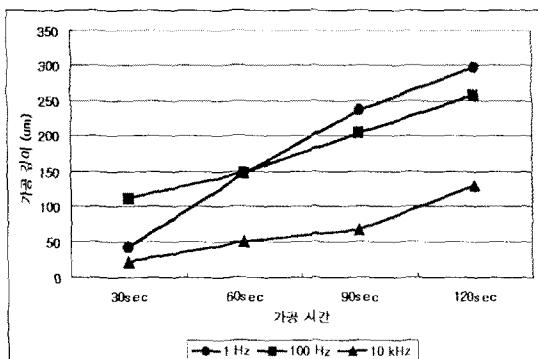


그림 5. 가공시간에 따른 주파수별 가공된 구멍 깊이

그림 6은 전압 주파수 100Hz에서 duty ratio에 따른 가공된 구멍의 상부 직경을 나타내었다. 가공시간 60초 이후부터는 일반적으로 duty ratio가 커질수록 상부 직경이 작아짐을 알 수 있다.

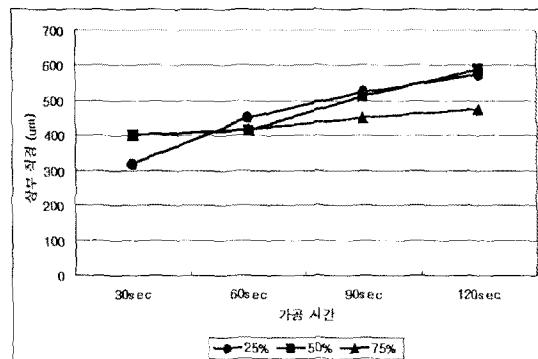


그림 6. 가공 시간에 따른 duty ratio 별 상부 구멍 직경

그림 7은 전압 주파수 100Hz에서 duty ratio에 따른 가공된 구멍 깊이를 나타내었다. 30초 이상에서는 duty ratio가 줄어들수록 가공 깊이는 더 깊다는 것을 알 수 있다.

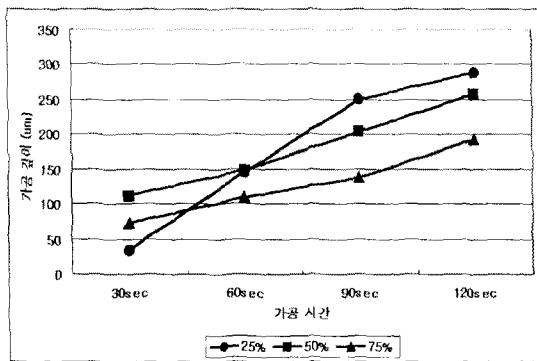


그림 7. 가공 시간에 따른 duty ratio 별 가공 깊이

Duty ratio가 작을수록, 즉 방전의 휴지기가 길 수록 가공열이 생작되는 시간이 길어져 가공되는 양이 줄어들 것으로 여겨지나, 실험결과는 그 반대 경향을 보이고 있어 이에 대한 보다 정확한 실험과 해석을 진행 중에 있다. 실험결과에 의하면, 열변형이 없는 미세한 구멍을 제작할 때는 duty ratio를 크게 하는 것이 바람직하다. 그러나 주파수 변화와 duty ratio 변화에 따른 가공성능에

미치는 영향을 비교하여 보면, duty ratio 경우가 영향력이 약으로, 열변형이 적은 미세한 구멍 제작을 위해서는 duty ratio 보다는 주파수를 변화시키는 것이 효과적이라 사료된다.

4. 결 론

전해 방전 가공은 유리, 복합 재료 등의 가공에 적용되고 있으며 최근 MEMS 분야에서도 활발히 연구되어지고 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

전해 방전 가공은 수용액으로 방전이 일어나며 가공물이 방전 열 발생 구역 안에 있을 때 가공이 일어난다. 공구가 노출되는 수용액의 깊이가 깊으면 전기 분해 현상이 일어나고 얕을 때에는 방전이 일어나지지만 방전이 진행됨에 따라 수용액의 증발이 일어나므로 수용액의 높이를 조절하는 것은 별도의 장치가 필요하다. 또 전극의 오염을 막기 위한 별도의 장치가 요구되어진다. 음전극은 방전 열에 의하여 변형되므로 적절한 시기의 교환이 요구되어진다. 전압 파형의 주파수가 높을수록 혹은 duty ratio가 클수록 가공된 구멍의 상부 직경과 구멍 깊이는 작아진다. 따라서 열변형이 적은 미세한 구멍의 제작을 위해서는 주파수는 높게 하고 duty ratio는 크게 하여 가공률을 적게 하는 것이 좋다고 여겨지는데, duty ratio 보다는 주파수의 변화가 바람직하다.

(참 고 문 헌)

- [1] Daniel J. Sadler, Wenjin Zhang, and Chong H. Ahn, "Micromachined semi-enclapsulaed spiral inductors for micro electro mechanical systems (MEMS) applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No 5, pp. 3319-3321, 1997
- [2] V.K. Jain, P.M. Dixit, and P.M. Pandey, "On the analysis of the electrochemical spark machining process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 165-186, 1999
- [3] 정옥찬, 양의혁, 양상식, "유리의 미세 가공을 위한 전기화학 방전가공기술에 관한 실험적 연구", *Trans. KIEE*, Vol. 35, No. 9, pp. 1374-1379, 1996
- [4] 홍석우, 제우성, 최영규, 정귀상, "NaOH 수용액에 있어서 전기화학적 방전가공법에 의한 유리기판의 미세가공", *대한 전기학회 학제학술대회 논문집*, pp. 1500-1502, 1998
- [5] Indrajit Basak and Amitabha Ghosh, "Mechanism of spark generation during electrochemical discharge machining : a theoretical model and experimental verification," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 62, pp. 46-53, 1996
- [6] Indrajit Basak and Amitabha Ghosh, "Mechanism of material removal in electrochemical discharge machining : a theoretical model and experimental verification," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 71, pp. 350-359, 1997
- [7] Shuichi Shoji and Masayoshi Esashi, "Photoetching and electrochemical discharge drilling of pyrex glass," *Technical Digest of the Sensor Symposium*, pp. 27-30, 1990
- [8] A.K.M De Silva and J.A. McGeough, "Process monitoring of electrochemical micromachining," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 76, pp. 165-169, 1998
- [9] Naveen Gautam and Vijay K. Jain, "Experimental investigations into ECSD process using various tool kinematics," *International Journal of Tools & Manufacture*, Vol 38, No 1-2, pp. 15-27, 1998