

미세 방전을 이용한 3 차원 미세 구조물 및 미세 공구 제작

이영수[#], 김보현¹, 이상민¹, 주종남¹, 강영훈², 최태훈³, 박훈재³

Fabrication of 3-D Micro Structure and Micro Tool Using MEDM

Y. S. Lee, B. H. Kim, S. M. Yi, C. N. Chu, Y. H. Kang, T. H. Choi, H. J. Park

(Received November, 30, 2004)

Abstract

3-D micro structures and micro tools were fabricated using Micro Electrical Discharge Machining (MEDM). To make micro structures, micro electrical discharge milling process was applied. During micro electrical discharge milling, electrode (tool) worn in the both axial and radial direction. To compensate tool wear which has significant influence on machining accuracy, machining path overlapping was proposed. Machining characteristics of micro electrical discharge milling was investigated in considering of depth of cut and capacitance of discharge circuit. Micro complex shaped tools were also fabricated using REDM (reverse electrical discharge machining). Sacrificial electrodes were machined through electrical discharge milling process and were used as electrode to make micro tools. Using this process several micro tools shape of 'ㄷ', '□' and '○' were fabricated. With these complex shaped tools, micro machining was successfully applied repeatedly.

Key Words : Micro Electrical Discharge Machining, MEDM Milling, Reverse EDM, Micro Structure

1. 서 론

금형은 양질의 제품을 대량 생산하는데 필수적으로 사용되고 있으며, 흔히 주위에서 접하는 제품의 생산에 사용되는 금형은 절삭과 방전가공의 복합적인 공정에 의해서 제작되어 왔다. 그러나 산업 전반에 걸쳐서 미소한 크기를 가지는 제품에 대한 수요가 증가함에 따라서 소형 제품의 대량 생산을 위한 초소형 금형 제작이 필요하게 되었다. 이러한 초소형 금형은 수 밀리미터 이하의 크기를 가지면서 수 마이크로미터 혹은 그 이하

의 형상 정밀도를 유지할 필요가 있다. 이러한 초소형 금형을 가공하기 위해서는 기존의 절삭 공정으로는 한계가 나타나기 시작했으며 따라서 그 대안으로 제시되고 있는 것이 미세 방전 기술이다. 미세금형을 제작하기 위해서는 가공 속도와 가공물의 품질을 고려할 때 높은 방전 주파수를 얻을 수 있고, 전류 피크치가 높은 RC 방전회로가 방전을 일으키는 전원으로 널리 사용되고 있다[1~2]. 특히 미세 펀칭과 같이 미세 텀과 미세 홀의 정렬이 중요한 경우에는 간극이 1 μ m 이하로 유지되어야 하는 경우도 있으며[3], 이와 같이

1. 서울대학교 기계항공공학부

2. K-metro

3. 한국생산기술연구원

교신저자: 서울대학교 기계항공공학부,

E-mail:ysleeme@snu.ac.kr

미세한 정밀도를 요구하는 가공에는 RC 방전회로를 이용한 방전 가공이 적합하다.

이러한 방전 기술은 미세 형조 방전이나 미세 방전 밀링 등의 방법으로 금형의 제작에 적용될 수 있는데, 미세 형조방전의 경우 제작하고자 하는 제품의 형상과 동일한 형태의 방전 전극을 사용하여 금형을 제작하는 방법으로 방전 가공 중에 발생하는 전극의 마모 때문에 여러 개의 전극을 가공하여 사용하여야 하는 단점이 있다. 이에 반하여 Yu[4] 등은 단순한 형상의 전극을 이용하여 절삭에서의 밀링과 유사한 형식으로 방전을 수행함으로써 3 차원 구조물을 제작하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 전극의 형상이 단순하기 때문에 전극 가공에 소요되는 시간이 적고, 전극 형상과 상관없이 다양한 형상을 가공할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 미세 방전을 이용하여 복잡한 형상을 가공하는 방법에 대하여 연구하였다. 단순한 형태의 전극을 이용하여 금속 재질의 판에 복잡한 형상을 방전 밀링으로 가공하고 이 과정에서 전극의 마모와 가공 중에 발생하는 이차 방전 등으로 인한 형상의 왜곡을 줄일 수 있는 최적의 가공 조건을 선정하였다. 또한 역방전을 이용하여 복잡한 단면형상을 가지는 미세공구의 제작방법에 대하여 연구하고 이의 적용에 대하여 연구하였다.

2. 미세 방전 밀링

2.1 미세 방전 밀링 공구의 제작

미세 방전 밀링은 방전현상에 의해서 재료를 미세하게 제거하면서 원하는 형상을 만들어내는 방법이다. 미세 방전 밀링에 사용되는 미세 공구는 와이어 방전 가공(Wire Electro Discharge Machining)을 이용하여 제작하였다. 와이어 방전 가공은 보조 전극으로 황동 와이어를 사용하고 이를 지속적으로 공급하기 때문에 보조 전극의 마모에 따른 형상의 오차가 발생하지 않아 정밀한 형상을 가공하기에 적합하다[5]. 와이어 방전 가공의 개략도와 가공된 미세 공구를 Fig. 1 에 나타내었다. 본 연구에서는 초기 원형인 미세 공구를 와이어 보조 전극으로 가공하여 평면을 만들고 공구를 90 도씩 회전시키면서 가공하여 정사각형 형상의 공구를 제작하였다.

2.2 공구의 마모를 고려한 공구 경로 선정

미세 방전 밀링에서 사용되는 층별(layer-by-layer) 가공에서 발생하는 공구의 마모는 공구를 일정한 깊이만큼 축 방향으로 이송할 때 발생하는 마모와 공구를 경로에 따라서 평면으로 이송할 때 발생하는 마모로 나눌 수 있다. 각각에 의해서 공구는 축 방향으로 마모되며, 가공되는 공작물의 형상 정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 각각의 마모가 가공 후의 형상에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위하여 Fig. 2 와 같이 중앙부에 두 개의 벽을 가지는 사각형 공동을 제작하였으며, 그 오른쪽에 이 가공을 위한 공구 경로를 나타내었다.

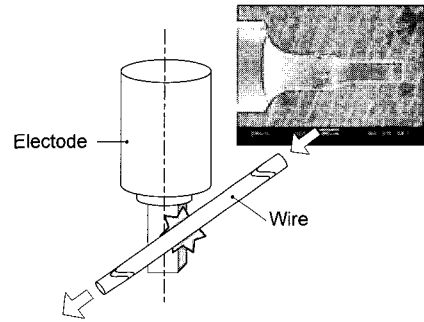


Fig. 1 Schematic diagram of WEDM

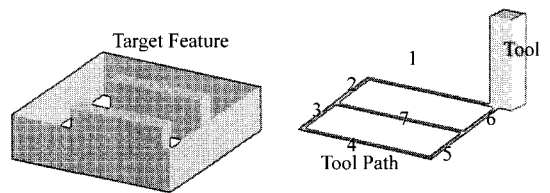


Fig. 2 Micro structure and tool path for machining

방전 밀링 가공 중에 공구의 마모가 발생하면 공구가 진행함에 따라서 바닥면의 높이가 달라진다. 따라서 바닥면 높이를 일정하게 유지하기 위하여 공구경로를 왕복하도록 작성하였고, 공구 마모에 의하여 발생하는 경로 간의 높이 차이를 보상하기 위하여 모든 가공 경로가 동일하게 반복되도록 경로를 선정하였다. 미세 벽을 가지는 미세 공동(micro cavity)을 제작하기 위한 공구 경로를 Fig. 3 에 나타내었다. 각각의 경로(Fig. 2 의 1-7)

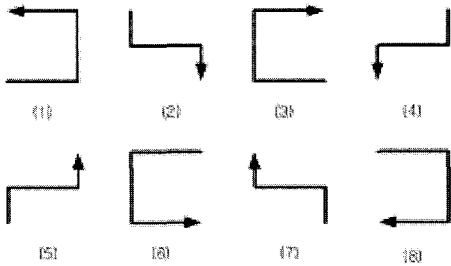


Fig. 3 Tool paths for machining micro cavity with micro walls

는 4 회 반복되며, 진행 방향은 시계 방향이 2 회 반시계 방향이 2 회로 동일하도록 설정하였다. 진행 방향을 고려하는 것은 한 경로를 지나가면서도 공구의 마모가 발생하기 때문에 이를 보상하기 위해서이다.

2.3 가공 조건에 따른 가공 특성

미세 벽을 가지는 미세공동을 가공할 때 단계별 가공 깊이와 축전용량과 같은 가공 조건에 따른 가공 특성을 살펴보고 최적의 가공 조건을 선정하였다. 우선 단계별 가공 깊이를 1 μ m, 2 μ m, 3 μ m, 5 μ m로 변화시키면서 공구의 마모와 가공 시간을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. 단계별 가공 깊이가 1 μ m 에서 5 μ m로 변화함에 따라서 전극의 후퇴 횟수가 증가하고 전극의 마모도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 단계별 가공 깊이가 5배가 되어 80%의 가공 시간 단축이 있어야 하지만 실제 가공 시간에서는 22.8%의 향상만이 나타났다. 가공 깊이가 큰 경우에 공구의 마모가 크고, 가공 상태가 불안정하기 때문에 한 층을 가공할 때 더 오랜 시간이 소요되었기 때문에 전반적인 가공 효율 상승을 얻을 수 없었다.

단계별 가공 깊이 1 μ m 와 5 μ m 에 대한 가공 결과는 Fig. 5(a), (b) 에 나타내었다. 그림에서와 같이 단계별 가공 깊이가 큰 경우에는 미세 벽의 측면에서 심한 테이퍼 형상이 관찰되고, 바닥의 왜곡 또한 심하게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

축전 용량의 변화에 따른 가공 특성을 살펴보기 위하여 단계별 가공 깊이는 2 μ m 로 고정하고 축전 용량을 10 pF, 100 pF, 500pF 으로 변화시켰다. 축전 용량을 변화시키더라도 공구의 마모에서는 큰 차이를 보이지 않고 100pF 일 때 가장 작게 나타나는 것을 Fig. 6 를 통하여 확인할 수 있다. 또한 가공 시간은 축전 용량이 증가할수록 더욱

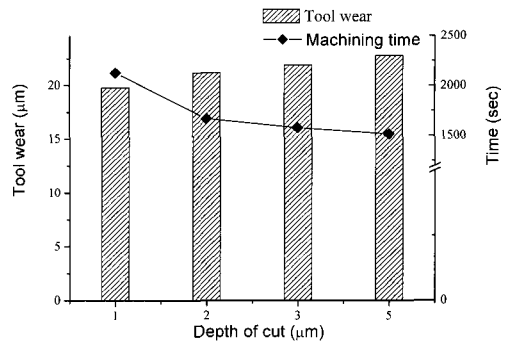


Fig. 4 Machining time and tool wear according to depth of cut

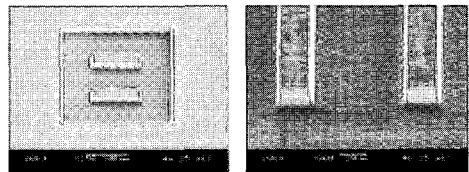


Fig. 5(a) EDMed micro cavity (depth of cut: 1 μ m; machining time: 1 hr 54 min)

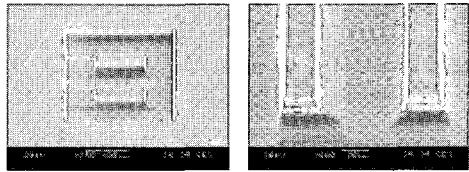


Fig. 5(b) EDMed surface (depth of cut: 5 μ m; machining time: 1 hr 28 min)

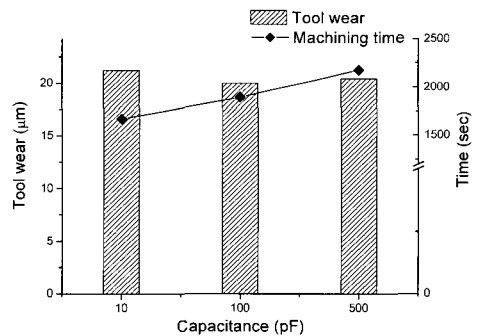


Fig. 6 Machining time and tool wear according to capacitance

오래 소요되는 것으로 나타났다.

일반적인 미세 구멍의 방전 가공에서는 큰 축전 용량을 사용하면 단발 방전 에너지가 크기 때문에 표면 품질의 저하를 불러일으키지만 가공 시간은 단축되는 것으로 알려져 있다[6]. 이는 구멍가공에서는 공구의 회전으로 인해 방전 부스러기들이 원활히 배출되기 때문에 부스러기가 가공 시간에 큰 영향을 미치지 않기 때문이다. 하지만 방전 밀링의 경우에는 이와 달리 공구의 회전이 없으므로 가공 중에 발생한 방전 부스러기가 가공 상태에 미치는 영향이 크고 따라서 축전용량이 클수록 가공 상태가 불안정해진다. 따라서 원활한 가공을 위해서는 공구와 공작물이 단락이 되는 경우에는 공구를 후퇴시켜서 가공 상태를 개선하는 방법을 사용하고 있다. 실제로 10 pF, 100 pF, 500pF 으로 축전용량을 변화시키면서 측정된 공구의 후퇴횟수는 각각 274회, 429회, 557회로 축전용량이 커지면 같이 증가하는 것으로 파악되었다. 그에 따라서 가공 시간 역시 축전용량이 증가할수록 더 오래 소요된 것으로 판단할 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 복합 형상을 가공하였으며 결과는 Fig. 7(a)에 나타내었다. 이 복합 형상은 중앙에 내부 공동을 가지고 바깥쪽에 낮은 홈이 파져 있는 형태이고, 외부의 홈은 회전하는 공구를 사용하여 단계별 가공 깊이 1 μ m, 축전 용량 100pF 으로 가공하였으며, 내부의 공동은 사각형 공구를 이용하여 단계별 가공 깊이 1 μ m, 축전 용량 10pF 으로 가공하였다. Fig. 7(b)에 보이는 내부 형상의 외곽의 코너부의 모서리가 방전 가공 후에도 여전히 날카롭게 유지되는 것을 확인할 수 있으며, 내부 형상의 테이퍼도 거의 없음을 확인할 수 있다. 또한 낮은 축전 용량을 사용하였기 때문에 바닥 표면의 품질도 우수한 것을 확인할 수 있다.

3. 미세 역방전을 이용한 공구 제작

3.1 미세 공구 제작

미세 방전 밀링을 이용한 미세 형상의 제작과 함께 미세 역방전(Micro REDM)을 이용하여 복잡한 단면 형상을 가진 미세 공구와 미세 형상의 대량 가공에 대하여 연구하였다. 일반적으로 미세 공구를 제작하기 위하여 WEDM 방법을 사용하게 된다. 그러나 이 경우 가공이 가능한 형상이 볼록한 형상(convex feature)에 국한되는 경우가 많고,

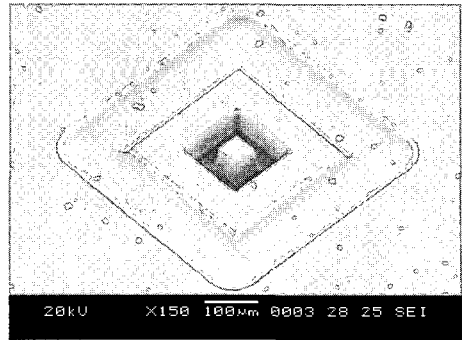


Fig. 7(a) Micro structure with complex features (overall feature)

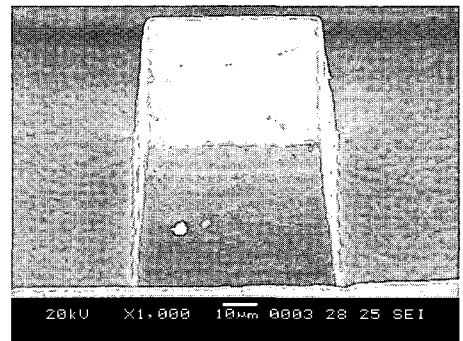


Fig. 7(b) Micro structure with complex features (center island)

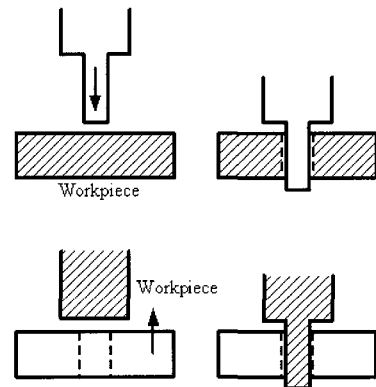


Fig. 8 Micro tool fabrication using REDM

오목한 형상(concave feature)을 가공하기 위해서는 별도의 복잡한 치구들이 필요하며, 그 형상에도 큰 제약을 받는다[7]. 이를 극복하기 위하여 희생 전극을 사용하여 방전을 수행하였는데 이를 역방전이라 한다[4]. 역방전으로 미세 전극을 제작

하는 과정은 Fig. 8에 나타내었다. 우선 미세 공구를 제작하고 이를 이용하여 희생 전극이 되는 금속판에 원하는 형상을 제작한 후에 희생 전극을 이용하여 다시 공구에 그 형상을 전사시키는 순서로 미세 공구를 제작하였다.

희생 전극의 재료로 구리를 사용하였고, 희생 전극을 가공하거나 최종적으로 얻어지는 전극은 텅스텐 카바이드(WC)를 사용하였다.

제작된 미세 공구 형상을 Fig. 9(a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 9(a)에 나타낸 것은 ‘ㄷ’자 형상으로, 한쪽면이 오목하게 들어가 있어 일반적인 WEDM 공정으로 제작하기 불가능한 형상이지만, 역방전을 통하여 쉽게 제작할 수 있었다. 오른쪽 사진은 이 때 사용된 희생 전극의 형상을 가공이 끝난 후에 촬영한 사진이다.

또한 Fig. 9(b)에 나타낸 ‘ㄱ’자 형상은 바깥쪽 벽보다 중앙의 벽을 높게 가공하여 단계별로 다른 높이를 가지는 공구를 제작할 수 있음을 보여준다. 이를 공구로 사용하여 미세 전해 가공한 결과가 오른쪽의 그림과 같다.

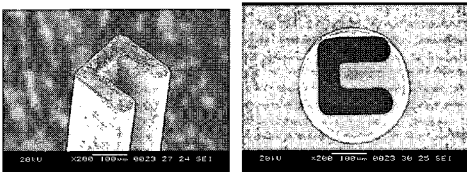


Fig. 9(a) REDMed electrode and sacrificial electrode (Korean character ‘ㄷ’)

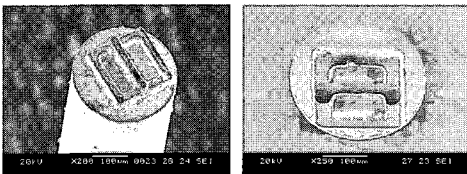


Fig. 9(b) REDMed electrodes and machined feature (Character ‘ㄱ’)

3.2 역방전을 이용한 다중 전극 제작

미세 역방전을 이용하여 미세 전극을 제작하는 기술을 이용하면 다중 전극을 제작할 수 있다. 여기서 다중 전극이라는 것은 동일한 형태의 전극이 다중으로 배치된 것을 의미한다.

다중 전극을 제작하는 방법도 앞서 미세 공구를 제작하는 방법과 유사하다. 우선 원하는 형상을 여러 개 희생 전극에 가공한 후에 이를 역으

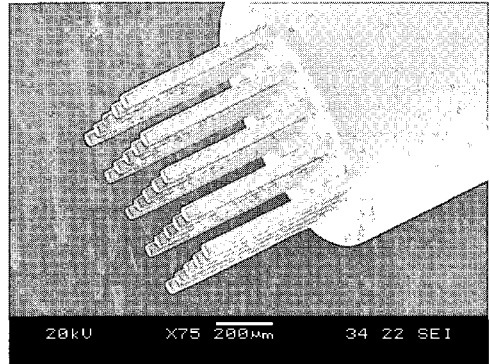


Fig.10 Multiple electrode

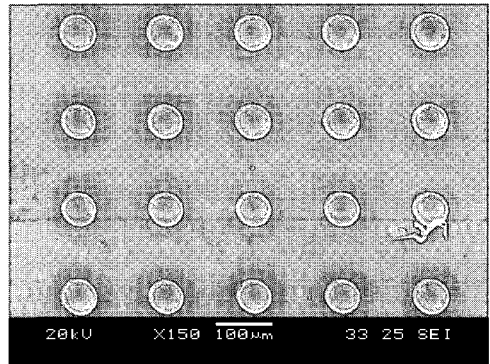


Fig.11 Micro cavity array

로 전사하는 방법으로 제작된다.

이렇게 제작된 전극을 Fig. 10에 나타내었다. 그림에 나타난 전극은 각각이 50µm의 직경을 가지는 미세 축을 5×5로 배치한 것이다.

이를 공구로 사용하여 미세 방전을 수행한 것을 Fig. 11에 나타내었다. 방전 가공된 깊이가 작기 때문에 초기의 공구 마모가 작용하여 가공된 미세 형상이 구형에 가까운 형태를 가지고 있다.

이와 같이 역방전을 이용하여 복합형상의 공구를 제작하고 이를 보다 발전시켜 다중 전극을 제작하였으며, 이렇게 제작된 전극을 이용하여 방전을 수행함으로써 생산성의 향상을 가져올 수 있다.

4. 결론

미세 방전 기술을 이용하여 3차원 미세 형상을 제작하였고, 각각의 가공 조건에 따른 가공 특성을 분석하였다. 또한 미세 전극을 역방전을 이용

하여 제작함으로써 오목한 형상이나 다층 구조의 형상 공구를 제작하였으며, 이를 발전시켜 다중 전극을 제작하고 이를 이용하여 미세 형상을 한번의 공정으로 대량 가공하였다.

(1) 미세 방전 밀링에서 단계별 가공 깊이와 축전 용량이 중요한 가공 조건이 되며, 단계별 가공 깊이와 축전 용량을 최소화 하는 것이 형상 정밀도 향상에 유리하다. 또한 단계별 가공 깊이와 축전 용량을 최소화 하더라도 가공 시간에서 손실이 크지 않다.

(2) 미세 역방전을 통하여 오목한 형상이나 단계별로 다른 높이를 가지는 복잡한 공구의 형상을 가공할 수 있다.

(3) 희생 전극에 같은 형상을 여러 개 가공하고 이를 이용하여 전극을 가공함으로써 다중 전극을 제작할 수 있었다.

이와 같은 결과를 이용하면 미세 금형과 같은 복잡한 형상을 가지는 3 차원 형상을 가공할 수 있으며, 역방전을 이용한 미세 공구 가공 기술을 이용하면 공구의 대량 제작 및 이를 통한 대량 가공이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업

의 세부과제로서 수행중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- [1] T. Masaki, K. Kawata, T. Masuzawa, 1990, Micro electro-discharge machining and its applications, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical System Workshop, pp. 21~26.
- [2] 増沢隆久, 2000, やさしいマイクロ加工技術, 日刊工業新聞社, 東京.
- [3] 주병윤, 임성한, 오수익, 2004, 25 μ m 홀 펀칭 공구 정렬을 위한 광학적 시스템 설계, 한국소성가공학회지, 제 13 권, 제 3 호, pp. 199~204.
- [4] Z. Yu, K. P. Rajurkar, 2000, Generation of complex micro cavities by micro EDM, Transactions of NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 233~237.
- [5] T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayasi, T. Suzuki, 1985, Wire electro-discharge grinding for micro-machining, Annals of CIRP, Vol. 31, No. 1, pp. 431~434.
- [6] 박동희, 류시형, 김보현, 주종남, 2003, 미세 방전 가공에서 방전 면적과 축전 용량에 따른 가공을 특성, 한국정밀공학회지, 제 20 권, 제 12 호, pp. 183~190.
- [7] 김성한, 2003, 와이어 방전 가공을 이용한 Micro-BGA 공구 형상 가공, 서울대학교, 석사학위 논문.