한국정밀공학회지 제 21 권 제 9 호 (2004 년 9 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 9, September 2004.

마이크로 방전 밀링을 이용한 미세 구조물 제작

이병욱*, 이상민#, 김보현*, 주종남**

Fabrication of 3D Micro Structure Using Micro Electrical Discharge Milling

Byung Uk Lee*, Sang Min Yi#, Bo Hyun Kim*, Chong Nam Chu**

ABSTRACT

As mechanical structures are minimized, the demand on micro dies and molds has increased. Machining complex 3D shapes requires fabrication procedures for preparing the electrodes. Micro electrical discharge milling using a simple shape electrode can produce 3D micro structure. In this paper the machining characteristics of micro electrical discharge milling according to depth of cut and capacitance are investigated. The machining time is diminished when simple tool-paths and algorithms for changing the feedrate are applied. But a distorted bottom shape and a tapered wall shape are inevitable after machining. The distorted bottom shape and the taper angle of wall are reduced by finish machining.

Key Words : Micro Electrical Discharge Milling (미세 방전 밀링), Depth of Cut (단계별 가공 깊이), Capacitance (축전용량), Tool Paths (공구 경로), Finish Machining (정삭 가공)

1. 서론

미세 방전 가공은 전도성을 가진 광범위한 재료를 경도와 무관하게 가공할 수 있으며, 0.1 μm 단위의 표면 거칠기와 우수한 형상정밀도를 얻을 수 있는 장점이 있다.[1] 이로 인해, 미세 형상 가공 기술로 크게 각광 받고 있으며, 특히 미세 구멍 가공에 많이 적용되어왔다.[2, 3] 그러나 현재는 단순 구멍 가공뿐만 아니라, 미세 금형과 같은 3 차원 형상 가공의 필요성도 점차 증가하고 있다. 미세 방전을 이용한 형상 가공은 전극의 형상에 따라 형조 방전과 방전 밀링으로 나눌 수 있다. 형조 방전은 가공물의 형상과 같은 전극을 가공한 후 전사하는 방법이다. 하지만 이는 전극의 마모로 인하여 여러 개의 전극이 필요하며 정밀한 가공을 위해서는 여러 단계의 가공을 거쳐야 된다. 이에 반해 Yu[4] 는 단순 전극을 이용한 방전 밀링으로 원하는 3 차원 형상을 가공하였다. 그러나 이 또한 가공 경로가 복잡하고 가공 시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

본 논문에서는 가공 조건에 따른 미세 방전 밀링의 가공 특성을 살펴보고, 이를 통해 최적의 가공 조건을 찾고자 한다. 또한, 단순화된 가공 경로와 가변 이송속도의 사용이 가공 시간에 미치는

접수일: 2004 년 3 월 18 일; 게재승인일: 2004 년 6 월 11 일
* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
# 교신저자: 서울대학교 대학원 기계항공공학부
E-mail: air9@dreamwiz.com (02) 880-7147
** 서울대학교 기계항공공학부

영향을 살펴보고 정삭 가공을 통해 3 차원 구조물의 형상 정밀도를 높이고자 한다.

2. 미세 방전 가공 시스템

2.1 미세 방전 가공 회로

방전회로는 트랜지스터 방전회로와 RC 방전회로로 나눌 수 있다. 트랜지스터 방전회로는 가공물로 들어가는 전류를 차단시켜 절연회복이 매우 빠르고 충격계수가 매우 높아 가공속도를 향상시킬 수 있다. 이에 반해 RC 방전회로는 비록 충격계수는 낮지만, 트랜지스터 방전회로에서 얻기 힘든 0.1 μs 이내의 짧은 펄스폭과 상대적으로 높은 전류 피크치를 얻을 수 있어 저에너지, 고주파 방전이 요구되는 마이크로 방전회로에 적합하다.[5] 따라서 본 실험에서는 RC 방전회로를 사용하였다. Fig. 1 은 본 연구에서 사용한 RC 방전회로의 개략도이다.

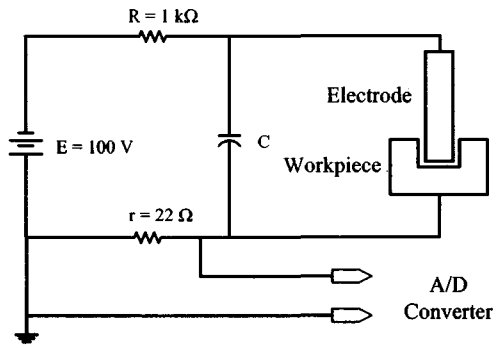

Fig. 1 Schematic diagram of RC electrical discharge circuit

2.2 미세 방전 가공 시스템

본 시스템에서는 X, Y, Z 축과 C 축(회전축)의 4 축 제어를 하고 있다. X, Y 축의 구동모터는 리니어 DC 모터를 사용하였고 Z 축의 이송정밀도는 전극의 마모와 가공물의 형상정밀도에 직접적인 영향을 미치게 되므로 백래쉬 영향을 최소화하기 위해 공압평형 시스템을 장착하고 DC 서보모터와 리니어 엔코더로 폐루프 위치제어를 하였다. 주축 시스템의 회전정밀도는 전극의 형상과 미세 구멍의 품질을 좌우하게 되므로 DC 서보모터에 정압

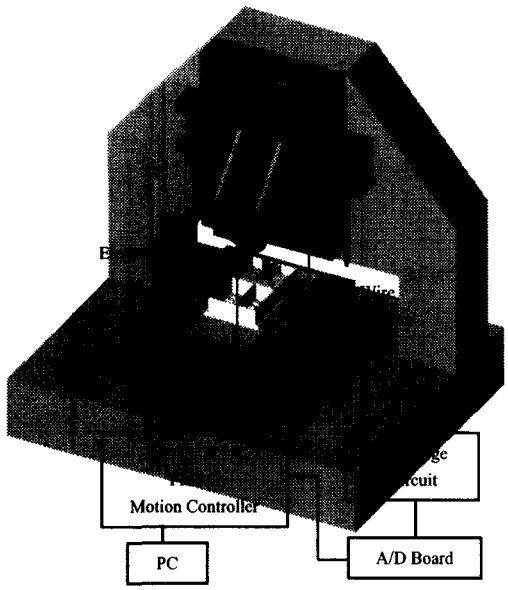

Fig. 2 Schematic diagram of micro-EDM system

공기 베어링을 사용하였다. Fig. 2 는 미세방전가공 시스템의 개략도이다.

방전 가공에서 미세 구멍을 가공하기 위해 사용하는 전극직경은 매우 작기 때문에 기계적 가공으로는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 미세 와이어 방전 가공(WEDM)을 이용하여 전극을 제작하였다.[6] 보조전극으로 황동 와이어 전극을 사용하고 와이어 가이드를 따라서 와이어 전극이 일정한 장력을 가지도록 일정한 속도로 공급함으로써 전극 마모의 영향 없이 미세 전극을 가공할 수 있었다.

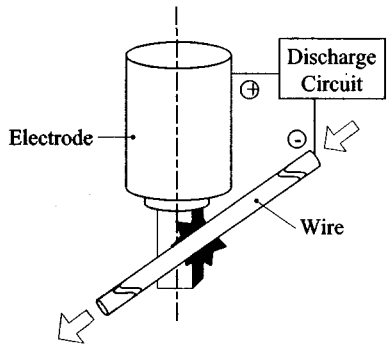

Fig. 3 Schematic diagram of WEDM

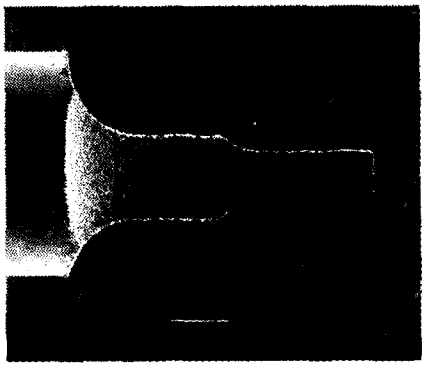

Fig. 4 Square electrode machined by WEDM

Fig. 3 에서 미세 와이어 방전 가공의 개략도를 보여주며 Fig. 4 는 실제 가공된 정사각형 전극의 SEM 사진이다.

3. 가공 조건에 따른 미세 방전 밀링의 특성

3.1 방전 밀링 원리와 가변 이송속도

미세 방전 밀링의 가장 큰 문제점은 전극의 마모이다. 특히 사각형 전극을 이용하여 방전 밀링을 하는 경우 모서리 부분은 더 쉽게 마모되어 원하는 형상을 얻기 힘들다.[7] 따라서 전극의 바닥면이 전체적으로 균일하게 마모 되어 가공이 이루어져야 정밀한 3 차원 형상의 구조물을 가공할 수 있다. 이를 위해 단계별 가공 깊이를 최소화함으로써 전극의 바닥면 전체가 마모되어 전극의 형상이 회복되도록 하였다.[4] Fig. 5 는 가공 중에 전극 끝부분의 변형과 가공형상의 변화를 보여주고 있다. 그러나 단계별 가공깊이를 작게 하면 가공 시간이 길어지는데 이에 대한 해결책으로 본 실험에서는 가변 이송속도를 사용하였다. 기본 이송속도 값을 0.5 μm/sec 로 설정하고 방전 상태에 따라 전극의 이송속도를 변화시켰다. 즉, 가공이 원활히 이루어질 때는 이송속도를 0.5 μm/sec 씩 증가시키고 가공이 불안정지면 이송속도를 0.5 μm/sec 씩 감소시켰으며, 전극과 공작물의 단락이 발생하면 전극을 1 μm 뒤로 후퇴시켰다. 이 방법을 적용하면 전극이 완전히 마모되어 가공이 일어나지 않는 구간에서 높은 이송속도를 나타낸다. 즉, 전극이 마모되어 가공이 일어나지 않는 구간에서는 이송속도를 높여줌으로써 이송속도를 일정하게 적용함으로써 발생하는 비효율적인 시간을 절약하여 전체 가공시간을 크게 줄일 수 있다. 슬롯 가공 실험에서 단계별 가공 깊이가 1 μm 일 때 고정 이송속도 1 μm/sec 로 가공하면 가공 시간이 1 hr 50 min 이 소요된다. 이는 가변 이송속도를 사용하였을 때 가공 시간이 36 min 걸리는 것을 생각하면 무려 3 배 이상 증가한 것이다. 따라서 가변 이송속도를 사용함으로써 전체 가공 시간을 크게 줄일 수 있다.

3.2 공구 경로

미세 방전 드릴링과는 달리 미세 방전 밀링은 공구 경로가 가공면의 형상에 중요한 영향을 미친다. 한 층을 가공하고 나면 전극의 마모로 인해 가공 표면이 경사지게 된다. 따라서 원하는 형상에 맞춰 공구 경로의 중첩을 일정하게 하고 왔던 경로를 되돌아오게 해야 한다. Fig. 6 은 두 개의 미세 벽을 만들기 위한 공구 경로이다. 공구 경로는 (1) 에서 (8) 까지 총 8 단계로 구성되어있다.

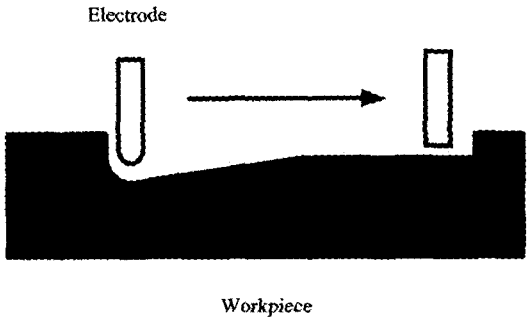

Fig. 5 Alteration of the electrode tip by wear

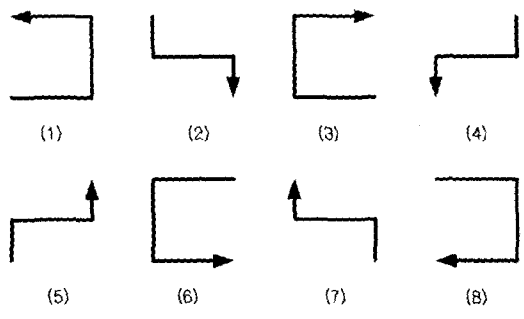

Fig. 6 Tool paths for machining two micro walls

한 단계마다 Z 축 방향으로 가공하고 (1) 에서 (4) 까지 공구 경로가 두 번씩 겹친다. (5) 에서 (8) 까지의 경로는 (1) 에서 (4) 까지의 경로를 되돌아오도록 하였다.

3.3 가공 조건에 따른 실험

단계별 가공깊이와 축전용량에 따른 최적의 가공 조건을 찾기 위한 기초 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 기본적인 조건들은 Table 1 과 같다.

Table 1 Machining conditions

Electrode material	Tungsten carbide
Workpiece material	304 SS
Applied voltage	100 V
Dielectric fluid	Kerosene

3.3.1 단계별 가공 깊이에 따른 결과 비교

미세 방전 밀링에서 전극의 마모는 형상 정밀도에 악영향을 미친다. 마모된 전극의 모서리 부분이 그대로 전사되어 벽 모양에 테이퍼 형상이 생기고 바닥면도 왜곡된다. 따라서 방전으로 인한 마모가 전극 바닥면 전체에 균일하게 일어나야 하며, 이를 위해서는 단계별 가공깊이를 최소화 하여야 한다. 단계별 가공 깊이가 가공에 미치는 영향을 알아보기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다. 실험은 슬롯 가공을 하였고 한 변이 64 μm 인 정사각형 전극을 사용하여 축전용량 10 pF 에서 수행하였다. 가공길이는 130 μm, 가공깊이는 60 μm 이다.

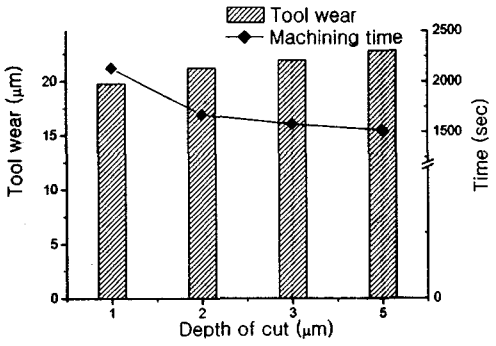

Fig. 7 Machining time and tool wear according to depth of cut per pass

Fig. 7 은 단계별 가공 깊이에 따른 전극 마모와 가공 시간을 비교한 결과를 나타내었다. 단계별 가공 깊이가 증가할수록 전극의 후퇴 횟수는 늘어났고 전극 마모도 증가하였다. 이에 반해 단계별 가공 깊이가 증가할수록 가공 시간은 줄어들었다. 하지만, 가공 시간이 단계별 가공 깊이에 정확히 반비례하여 줄어들지는 않았다. 이는 이송속도를 방전 상태에 따라 변화시켰기 때문이다. 단계별 가공 깊이가 1 μm 일 때가 2 μm 일 때와 비교하여 가공 시간이 2 배가 되어야 하지만 실제 가공시간은 1.28 배 밖에 되지 않았다. 단계별 가공 깊이가 1 μm 일 때 가공 상태가 양호하여 이송속도가 더 빨랐기 때문이다. 평균 이송속도는 단계별 가공 깊이가 1 μm 일 때 3.69 μm/sec, 2 μm 일 때는 2.37 μm/sec 였다.

Fig. 8 은 실제 미세 구조물을 가공하였을 때의 단계별 가공 깊이의 영향을 보여주고 있다. 축전용량은 10 pF 를 사용하였고 단계별 가공 깊이를 1 μm 와 5 μm 로 다르게 주었다. 전극은 정사각형 전극 67 μm 을 이용하였고 총 가공 깊이는 80 μm 를 주었다. 가공 시간은 단계별 가공 깊이가 1 μm 일 때가 26 분이 더 걸렸지만 전극의 마모는 단계

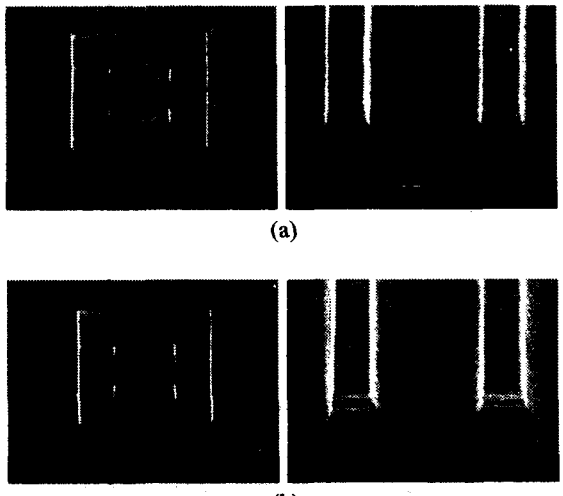

Fig. 8 Machined micro structures according to depth of cut per pass. (a) Depth of cut: 1 μm; Machining time: 1 hr 54 min, (b) Depth of cut: 5 μm; Machining time: 1 hr 28 min

별 가공 깊이가 1 μm 일 때가 43 μm 이고 5 μm 일 때는 48 μm 로 5 μm 가 더 적었고 벽면의 테이퍼 형상과 바닥면 왜곡이 훨씬 적었다. 단계별 가공 깊이가 5 μm 일 때는 전극의 바닥면으로 가공이 안 되고 마모된 모서리 부분으로 가공이 되어 벽면에 테이퍼 형상이 나타났다.

방전가공에서 방전에너지는 축전용량에 비례하므로 축전용량은 중요한 가공 조건 중의 하나이다. 따라서 축전용량에 따른 실험을 수행할 필요가 있다. 실험은 앞서 단계별 가공 깊이에 따른 결과 비교 실험과 동일한 조건에서 수행하였고 단계별 가공 깊이는 2 μm 이고 축전용량은 10 pF 에서 500 pF 까지 변화시켰다. Fig. 9 는 축전용량을 변화시켜가며 전극 마모와 가공 시간을 비교한 결과를 보여주고 있다. 전극을 회전시키지 않고 가공하였을 때 축전용량 100 pF 일 때가 500 pF 에 비해서 전극 마모가 줄어들지만 10 pF 일 때는 오히려 늘어나는 것을 볼 수 있다. 이는 축전용량이 증가할수록 단발 방전에너지가 증가하여 전극마모가 증가하지만 축전용량이 매우 작은 경우(≤ 100 pF)에서는 단발 방전에너지가 너무 작아 가공이 원활히 이루어지지 않기 때문에 전극마모가 증가하는 것이다.[8] 그러나 가공시간은 축전용량이 클수록 증가하였다. 이는 축전용량이 작을수록 전극 마모가 빠르게 진행되고 Fig. 5 에서 보듯이 가공이 일어나는 영역이 줄어들게 된다. 따라서 가공이 일어나지 않는 구간은 가변 이송속도를 사용하기 때문에 가공 속도가 빨라지게 되고 전체 가공 시간은 감소하게 된다. Fig. 10 은 실제 가공에서 축전용량의 크기에 의한 영향을 보여주고 있다.

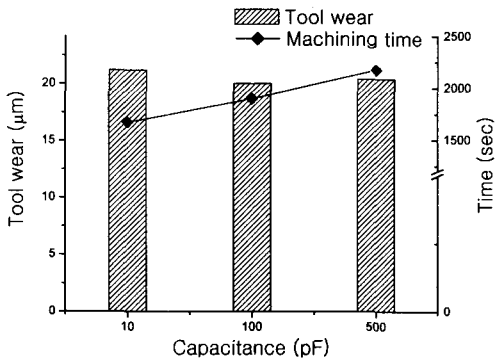

Fig. 9 Machining time and tool wear according to capacitance

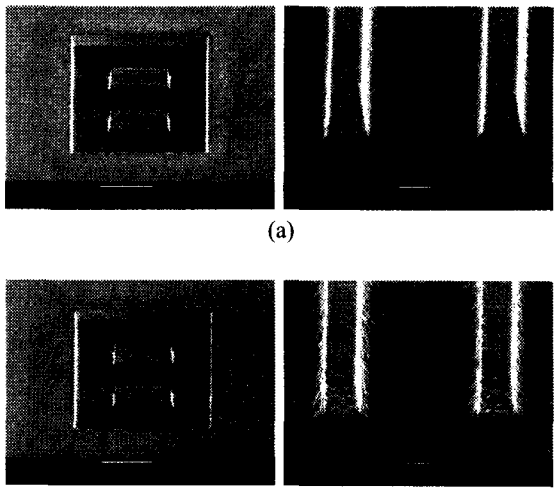

Fig. 10 Machined micro structures according to capacitance. (a) Capacitance: 100 pF; Machining time: 2 hr 2 min, (b) Capacitance: 500 pF; Machining time: 2 hr 39 min

앞선 실험과 동일한 가공 조건에 단계별 가공 깊이는 1 μm, 축전용량은 100 pF 와 500 pF 를 사용하였다. 100 pF 를 사용하였을 경우에 가공 시간도 줄어들었고 벽면의 라운드 형상도 덜 생겼다. 전극의 마모도 축전용량이 100 pF 일 때 35 μm 이고 500 pF 일 때는 38 μm 로 3 μm 가 더 적었다. 위의 실험을 통해 10 pF 를 사용하였을 경우가 100 pF, 500 pF 를 사용하였을 때보다 전극의 마모는 다소 늘어나지만 가공 시간이 줄어들고 높은 표면 품질을 얻을 수 있다.

4. 실험 결과

4.1 미세 벽을 가지는 캐비티 가공

3 장에서 단계별 가공 깊이를 작게 하면 가공된 형상의 정밀도가 좋아지며, 축전용량을 작게 하는 것이 가공 시간을 줄이며 표면 품질도 향상시킨다는 것을 위의 비교 실험을 통해 알 수 있었다. 그러나 위의 가공 조건을 사용하더라도 바닥면 형상의 왜곡과 벽면의 테이퍼 형상은 없앨 수 없었다. 바닥면의 경우 마지막 공구 경로에서 전극의 마모로 인해 층이 지는 형태로 왜곡이 나타나며, 벽면은 가공 부스러기에 의한 2 차 방전으로 테이퍼

형상으로 왜곡되어 나타난다. 따라서 별도의 정삭 가공을 통해 이러한 형상을 제거하였다. Fig. 11 은 축전용량 10 pF, 단계별 가공깊이 1 μm 의 가공조건에서 정사각형 전극 67 μm 를 사용하여 가공한 형상을 보여주고 있다. 정삭 가공은 하지 않았으며 총 가공 깊이는 80 μm 이다.

Fig. 11 에서 정삭 가공을 하지 않았을 경우 바닥면 형상의 왜곡과 벽면의 테이퍼 형상을 관찰할 수 있다. 벽의 테이퍼 각도는 13.2° 이다. 이러한 왜곡된 형상을 없애기 위해 본 실험에서는 두 가지의 정삭 가공을 수행하였다. 우선 바닥면의 왜곡 형상을 없애기 위해 마지막 공구 경로에서 깊이 방향의 가공을 하지 않고 전극을 이송시켰다.

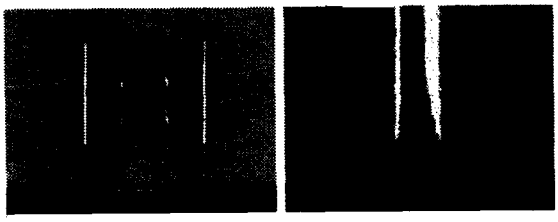

Fig. 11 Machined micro structures without finishing. Machining time: 2 hr 1 min; Cavity size: 238 μm × 237 μm; Wall size: 85.6 μm × 8 μm

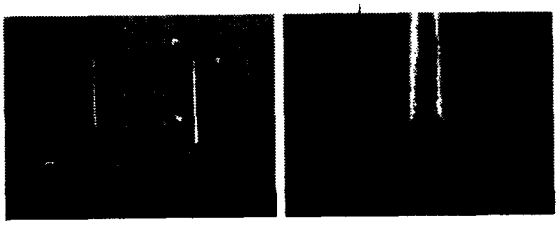

Fig. 12 Machined micro structures with finishing. Machining time: 3 hr 14 min; Cavity size: 191 μm × 190 μm; Wall size: 72 μm × 6.8 μm

벽면의 테이퍼를 줄이기 위해 전극을 벽면에서 안쪽으로 3 μm 이송을 주고 경계면을 따라 가공하였다. Fig. 12 는 축전용량 10 pF, 단계별 가공 깊이 1 μm 의 가공 조건에서 정사각형 전극 52 μm 를 사용하여 가공한 형상을 보여주고 있다. 위에 제시한 정삭 가공을 수행하였고 총 가공 깊이는 80 μm 이다. 앞서 정삭 가공을 하지 않은 실험에 비해 바닥면의 왜곡도 없어졌으며, 벽의 테이퍼 각도도 3.8° 로 크게 감소하였다.

4.2 미세 금형 가공의 예

위의 실험에서 미세 방전 밀링으로 두 개의 미세 벽을 가지는 캐비티 가공을 수행하였다. 이외에도 미세 방전 밀링으로 다양한 3 차원 형상의 구조물을 가공할 수 있다. 100 μm 의 원형 전극을 사용하여 외곽선을 가공하고 이 전극을 와이어 방전 가공(WEDM)으로 45 μm 의 정사각형으로 만들어 다시 안쪽 선을 가공하였다. 외곽선 가공은 단계별 가공 깊이를 1 μm, 축전용량 100 pF 를 사용하여 회전하면서 가공하였다. 회전 속도는 1000 rpm 을 사용하였다. 안쪽 면 가공은 단계별 가공 깊이를 1 μm, 축전용량 10 pF 를 사용하여 가공하 였다. Fig. 13 은 가공된 미세 구조물의 형상을 보여 주고 있다.

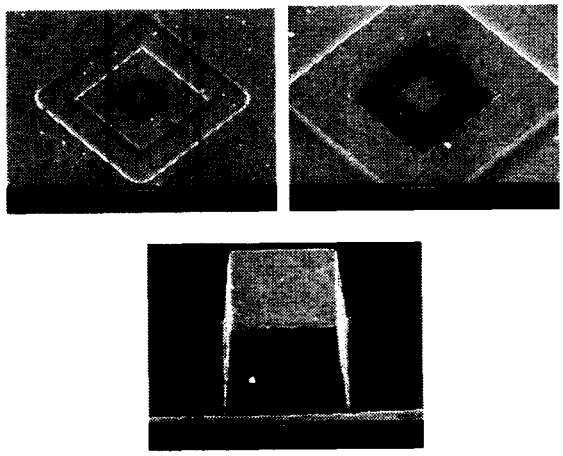

Fig. 13 Example of machined micro mold

5. 결론

단계별 가공 깊이, 축전용량 등의 가공 조건에 따른 미세방전 밀링의 가공 특성을 살펴보았으며, 이 결과를 통해 최적의 가공 조건을 선정하였으며, 단순화된 가공 경로와 가변 이송속도의 사용이 가공 시간을 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 실제 가공에서 발생하는 바닥면의 왜곡 형상과 벽면의 테이퍼 형상을 없애기 위해 마지막 가공 경로에 정삭 가공을 추가하여 3 차원 구조물의 형상 정밀도를 향상시켰다.

1. 미세 방전 밀링에서 단계별 가공 깊이를 크게 하면 전극 모서리 부분의 마모가 커져 벽면의 테이퍼가 심해지고 바닥면의 왜곡도 커지게 된다. 단계별 가공 깊이를 작게 하면 이러한 현상이 줄어들었다.
2. 축전용량이 매우 작은 경우(< 100 pF)가 큰 것보다 전극의 마모는 증가하지만 가공 시간이 줄어들고 높은 표면 품질을 얻을 수 있다. 축전용량이 작은 경우 가공시간이 줄어든 것은 가변 이송속도 알고리즘을 사용하였기 때문이다.
3. 바닥면의 왜곡 형상을 없애기 위해 마지막 공구 경로에서 깊이 방향의 가공을 하지 않고 전극을 이송시켰고, 벽면의 테이퍼 형상을 줄이기 위해 전극을 벽면 안쪽으로 이송을 주고 경계면을 따라 가공하였다. 이로 인해 바닥면의 왜곡 형상을 제거하였으며 벽면의 테이퍼 각도를 13.2° 에서 3.8° 로 크게 감소시켰다.

후기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. Masaki, T., Kawata, K. and Masuzawa, T., "Micro Electro-Discharge Machining and Its Applications," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical System Workshop, pp. 21-26, 1990.
2. Masuzawa, T., Tsukamoto, J. and Fujino, M., "Drilling of Deep Microholes by EDM," Annals of the CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 195-198, 1989.
3. Kim, G. M., Kim, B. H. and Chu, C. N., "Machining Rate and Electrode Wear Characteristics in Micro-EDM of Micro-Holes," Journal of the KSPE, Vol. 16, No. 10, pp. 94-100, 1999.
4. Yu, Z. and Rajurkar, K. P., "Generation of Complex Micro Cavities by Micro EDM," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 233-237, 2000.
5. 마이크로 가공기술 편집위원회, "마이크로 가공기술," 기전연구사, pp. 22-25, 1995.
6. Masuzawa, T., Fujino, M. and Kobayashi, K., "Wire Electrodischarge Grinding for Micro-Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34, pp. 431-424, 1985.
7. Tsai, Y. Y., Masuzawa, T. and Fujino, M., "Investigations on Electrode Wear in Micro-EDM," Proceedings of the International Symposium for Electromachining, ISEM XIII, Spain, pp. 719-726, 2001.
8. Cho, P. J., Lee, S. M., Choi, D. G. and Chu, C. N., "Characteristics of RC circuit with Transistor in Micro-EDM," Proceedings of the KSPE, pp. 235-240, October 2002.