

미세 캐비티 방전 가공에서 바닥면 형상 왜곡

임종훈*, 류시형#, 제성욱*, 주종남**

Distortion of the Bottom Surface in Micro Cavity Machining Using MEDM

Jong Hoon Lim*, Shi Hyoung Ryu#, Sung Uk Je* and Chong Nam Chu**

ABSTRACT

As mechanical components are miniaturized, the demand on micro die and mold is increasing. Micro mechanical components usually have high hardness and good conductivity. So micro electrical discharge machining (MEDM) is an effective way to machine those components. In micro cavity fabrication using MEDM, it is observed that the bottom surface of cavity is distorted. Electric charges tend to be concentrated at the sharp edge. At the center of the bottom surface, debris can not be drawn off easily. These two phenomena make the bottom surface of the electrode and workpiece distort. As machining depth increases, the distorted shape of electrode approaches hemisphere. This process is affected by capacitance and the size of electrode. By using a smaller electrode than the desired cavity size and appropriate tool movement, bottom shape distortion can be prevented.

Key Words : Micro cavity (미세 캐비티), Electrical discharge machining (방전 가공), Bottom surface distortion (바닥면 왜곡), Debris (가공 부스러기), Electrode wear (전극 마모)

1. 서론

최근 기계 요소의 소형화 추세에 따라 미세 형상 가공 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 지금까지 금속 등 고경도재의 미세 형상 제작을 위한 방법의 하나로 방전 가공 기술에 관한 연구들이 많이 진행되었으나 대부분 미세 구멍 등 단순 형상에 제한되었다.^{1,2,3} MEMS 기술의 발달과 더불어 단순 형상 가공 뿐 아니라 미세 입체 형상 제작 기술의 개발이 절실히 요구된다.⁴ Yu⁵ 는 전극의 3 축 이송을 통하여 미세 캐비티를 가공하였으나 가공 시간이 많이 소요되고 전극 마모를 고려하여 공구 경로를 결정해줘야 하는 어려움이 있었

다. 방전 가공을 이용한 미세 형상 가공은 전극 제작 방식에 따라 단순 전극 방식과 형방전 방식으로 나눌 수 있다. 단순 전극 방식은 복합 형상을 단순 형상의 조합을 통해 제작하는 것으로 원형이나 정사각형 등의 기본 형상의 전극을 사용하며, 형방전 방식은 가공해야 하는 형상의 반전된 모양의 전극을 제작하여 공작물에 전사시킴으로써 최종 형상을 얻어내는 방식이다. 미세 방전을 이용한 미세 금형 가공에서는 복잡한 형상의 전극을 제작하기가 용이하지 않고, 공구 마모를 고려한 전극 형상 제작 등의 문제가 있어서 단순 전극 방식이 더 효과적인 것으로 생각된다. 본 논문에서는 원형 및 사각형 전극을 통한 미세 캐비티 방전

: 2003 년 7 월 1 일 접수; 게재승인일: 2003 년 11 월 14 일
 * 서울대학교 대학원 기계항공공학부
 # 교신저자: 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
 Email ryu5449@plaza.snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147
 ** 서울대학교 기계항공공학부

가공에서 바닥면 형상 왜곡 현상에 대해 고찰하고, 이를 억제할 수 있는 방안에 관해 논의하였다.

2. 미세 캐비티 가공에서 바닥 형상 왜곡

사각형 전극을 이용한 미세 캐비티 방전 가공에서 바닥면의 중앙 부분이 솟아오르는 현상이 관찰되었다. Figure 1 은 바닥면 돌출 형상을 보여주는 SEM 사진이다. 이 현상의 원인은 크게 두 가지로 설명될 수 있다. 먼저 전극의 형상에 기인한 문제이다. 대전된 도전체에서 전하 (electric charge) 는 곡률이 큰 부분에 밀집되는 물리적 성질을 가지고 있어서 전극의 모서리 부분은 밀집된 전자들에 의해 위치에너지가 높아지게 된다. 방전은 전자가 절연 저항을 극복하고 이동할 수 있는 가장 좋은 경로를 통해 발생하므로 전극의 모서리부가 이러한 조건을 만족시킨다고 볼 수 있다. 따라서 전극의 모서리부를 따라 방전이 집중되게 된다. 다음으로 전극 가장자리 부위에 비해 전극 중앙부에서 가공 부스러기 (debris) 의 배출이 어렵다는 것 또한 그 원인으로 생각해 볼 수 있다. 중앙부의 가공 부스러기가 배출되지 않고 쌓이게 되면 전극 중앙부에서의 방전은 방해 받게 되고, 이에 비해 원활한 방전이 일어나는 가장자리 부분에서 가공이 집중되어 바닥면의 형상이 왜곡된 것으로 생각된다.

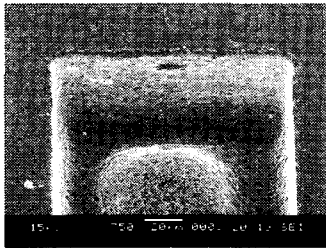


Fig. 1 The distorted shape of bottom surface. (304 SS, WC electrode, $128 \times 128 \times 100 \mu\text{m}^3$ cavity)

3. 실험 및 결과

앞 장에서 바닥면 돌출 현상의 원인으로 모서리의 방전 집중 현상과 전극 중앙부의 가공 부스러기 유착을 가정했다. 따라서 이 가정에 대한 근거를 제시하고, 두 현상이 어떤 과정으로 진행되

어 바닥면 돌출부를 형성하게 되는지에 대한 검증 실험을 수행할 필요가 있다. 실험에 사용된 기본적인 가공 조건은 Table 1 과 같다.

Table 1 Machining condition

Electrode	WC
Workpiece	304 SS
Voltage	100 V
Dielectric fluid	Kerosene

3.1 미세 방전 시스템 구성

본 연구에 사용한 미세 방전 시스템을 Fig. 2 에 나타냈다. 방전 가공기는 X, Y, Z 의 3 축과 주축 회전 C 축을 제어할 수 있으며, X, Y 축은 PARKER 사의 315082 ATMP 로 Z 축은 404200 XRMP 로 구성하였다. 각 축은 모두 $0.1 \mu\text{m}$ 의 이송 분해능을 가지며 stroke 는 $200 \mu\text{m}$ 이다.

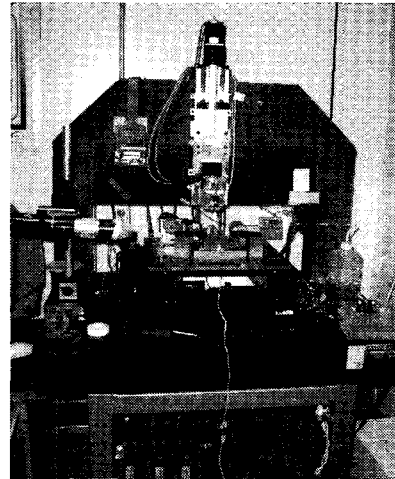


Fig. 2 MEDM system

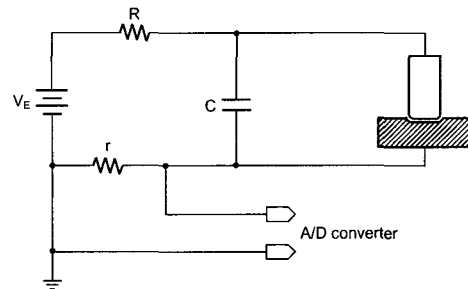


Fig. 3 Electrical discharge circuit

주축에 장착되어 있는 미세 전극을 Z 축 방향으로 이송시켜 가공을 수행한다. 전극 제작에는 wire electrical discharge machining² (WEDM) 방법을 이용했으며, 전원 회로는 Fig. 3 과 같은 RC 방전 회로를 사용했다.

3.2 전극 회전의 영향

일반적으로 원형 전극의 MEDM 가공 시에는 가공 부스러기의 원활한 배출과 방전 안정화를 위하여 전극을 회전시킨다. 따라서 전극을 회전시키지 않고 가공했을 경우에 중앙부의 가공 부스러기 용착이 심해져, 돌출 현상이 더 과도해질 것으로 예상된다. 실험은 직경 100 μm 의 전극으로 50 pF 에서 3000 pF 까지 축전 용량을 변화시켜가며 깊이 100 μm 를 가공할 때, 전극 회전을 한 경우와 하지 않은 경우 가공 바닥면을 비교하는 방식으로 수행했다. 그 결과를 Table 2 과 Table 3 에 나타냈다.

Table 2 Bottom surface distortion according to tool rotation and capacitance

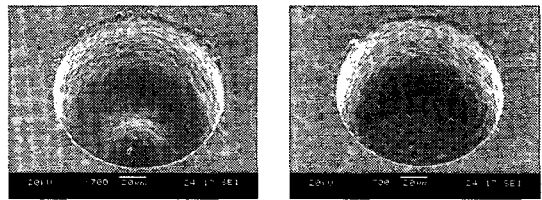
Capacitance	Rotation	No rotation
50 pF	O	O
500 pF	O	O
1000 pF	O	X
3000 pF	X	X

Table 3 Machining results according to tool rotation and capacitance

Capacitance	Rotation (time, size)	No rotation (time, size)
50 pF	395.76 sec, ϕ 105 μm	587.79 sec, ϕ 108 μm
500 pF	114.35 sec, ϕ 110 μm	385.19 sec, ϕ 114 μm
1000 pF	113.82 sec, ϕ 112 μm	485.74 sec, ϕ 109 μm
3000 pF	114.30 sec, ϕ 111 μm	446.82 sec, ϕ 112 μm

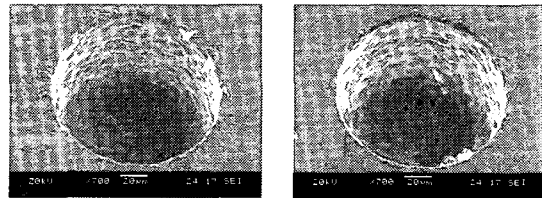
Table 2 에서 O 은 바닥면 돌출이 생겼음을 의미하고, X 는 생기지 않았음을 나타낸다. 실험 결과 예상과는 달리 회전을 시키지 않았을 경우에 더 낮은 축전 용량에서도 바닥면 돌출부가 없어진

것을 볼 수 있었다. 이것은 회전을 시키지 않은 경우, 측면 마모가 더 심해지는 것과 관련지어 생각해 볼 수 있다. 측면 마모가 심해지면 전극의 테이퍼가 커지게 되고 이것은 곧 전극의 끝부분이 보다 뾰족해지는 효과를 낸다. 따라서 가장자리 부분의 방전보다 전극 중앙부의 방전이 원활해지면서 돌출부의 가공이 일어나게 된다. 이 실험 결과는 측면 마모가 전극의 형상 변화 및 가공면의 형상에 영향을 준다는 것을 의미한다. Figure 4 는 1000 pF 에서 ϕ 100 μm 의 원형 전극을 회전시켰을 때와 회전시키지 않았을 때의 바닥 형상을 나타내며, Fig. 5 에서 보듯이 3000 pF 에서는 회전 유무에 관계없이 바닥면 돌출이 발생하지 않았다.



(a) rotation, ϕ 112 μm cavity (b) without rotation, ϕ 109 μm cavity

Fig. 4 Bottom surface with and without tool rotation. (1000 pF, 100 μm machining depth)



(a) rotation, ϕ 111 μm cavity (b) without rotation, ϕ 112 μm cavity

Fig. 5 Bottom surface with and without tool rotation. (3000 pF, 100 μm machining depth)

3.3 전극 크기의 영향

동일한 축전 용량에서 가공할 경우 전극의 크기는 전극 마모에 영향을 준다. 일반적으로 전극의 크기가 작을수록 전극 마모가 커지게 되며, 이는 전극 형상 변화가 보다 심하게 일어남을 의미한다. 따라서 전극 크기가 작은 경우의 바닥면 돌출 현상이 전극 크기가 큰 경우에 비해 그 정도가

줄어들 것으로 예상된다. 이에 대한 실험은 한번이 50 μm , 100 μm 인 정사각형 전극을 이용하여 깊이 100 μm 의 캐비티를 가공하는 방식으로 수행했고, 이 때 축전 용량은 100 pF 에서 3000 pF 까지 변화시켰다. 실험에 사용된 전극 재질은 WC 이고, 두께 300 μm 의 304 SS 를 공작물로 사용했다. 실험 결과 예상했던 바와 같이 전극 크기가 작은 경우에 더 낮은 축전 용량에서 바닥면 돌출 현상이 사라짐을 확인할 수 있었다.

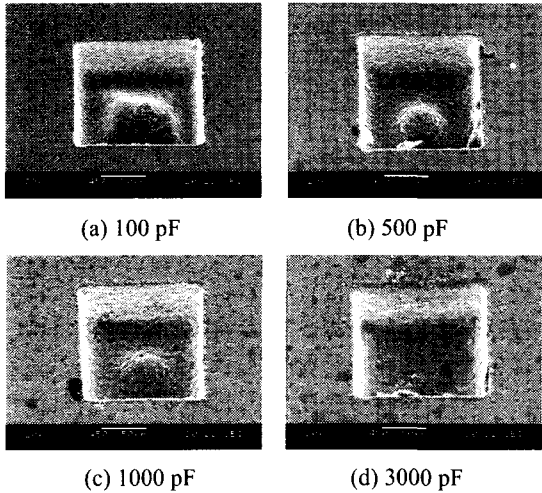


Fig. 6 Bottom surface with square electrode. (100 \times 100 μm^2)

Table 4 Electrode wear according to tool size and capacitance (μm)

Capacitance	50 \times 50 μm^2	100 \times 100 μm^2
100 pF	35.05	23.01
500 pF	22.95	17.29
1000 pF	11.90	10.98
3000 pF	10.86	9.95

Table 5 Bottom surface distortion according to tool size and capacitance

Capacitance	50 \times 50 μm^2	100 \times 100 μm^2
100 pF	O	O
500 pF	Δ	O
1000 pF	X	O
3000 pF	X	X

이로부터 바닥면 돌출 현상이 가공 부스러기와 함께 전극의 형상과 관련되어 있음을 알 수 있으며, 앞서 추정했던 측면 마모에 의한 영향을 뒷받침해주는 근거가 된다. Figure 6 은 100 μm 정사각형 전극을 사용했을 때 축전 용량에 따라 형성된 캐비티의 형상이다. Table 4 는 전극의 크기에 따른 전극 마모량을 나타내며, Table 5 는 전극 크기에 따른 바닥면 돌출 여부를 나타낸다. O 는 바닥면 돌출이 존재함을 뜻하고 X 는 존재하지 않음을, Δ 는 아주 미약하게 존재함을 나타낸다.

3.4 축전 용량의 영향

지금까지의 실험은 축전 용량을 50 pF 에서 3000 pF 까지 4 단계로 변화 시키면서 수행했다. 그 결과 축전 용량이 커질수록 바닥면 돌출부가 줄어들고, 특히 3000 pF 에서는 모든 실험에서 바닥면 돌출부가 생기지 않았음을 볼 수 있었다. 이것은 높은 축전 용량에서는 방전 폭발 압력이 커져서 전극 형상에 의해 생긴 바닥면 돌출부에 가공 부스러기가 응착하는 것이 감소되어 나타나는 현상이라고 보여진다. Figure 7 은 직경 100 μm 의 전극으로 축전용량을 50 pF 에서 3000 pF 까지 변화시키면서 깊이 100 μm 의 캐비티를 가공했을 때의 형상이다.

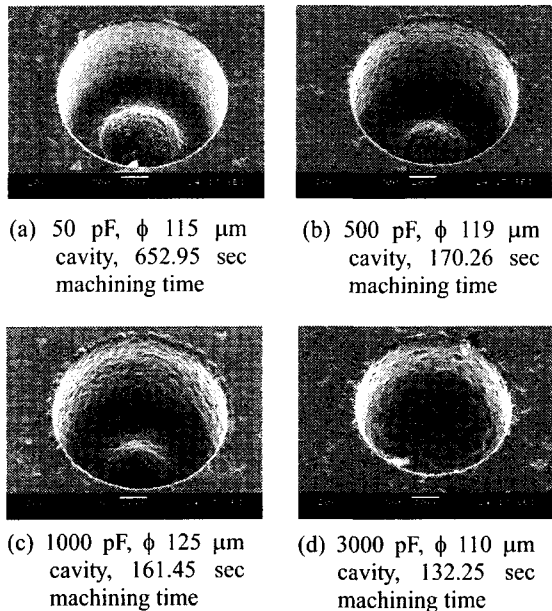
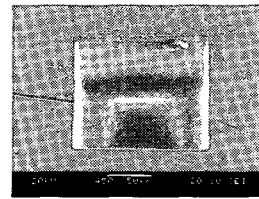
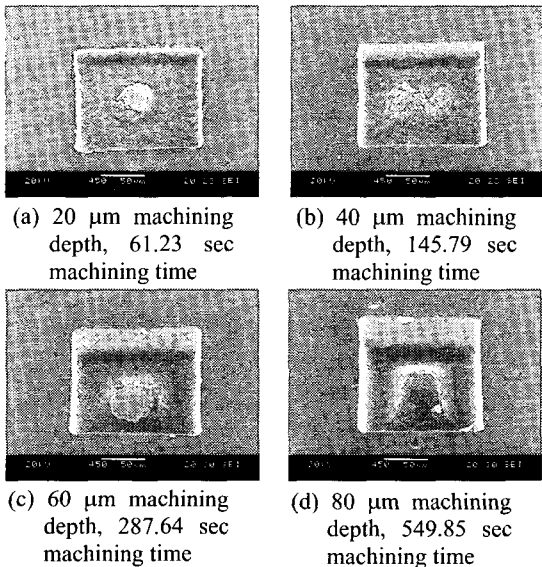


Fig. 7 Bottom surface according to capacitance

3000 pF 에서 가공한 캐비티는 다른 캐비티에 비해 그 크기가 작았는데, 이것은 높은 축전 용량으로 인해 전극 마모가 심해지면서 실제 가공 깊이가 100 μm 에 미치지 못하여 생긴 결과이다. 이 결과는 3000 pF 에서는 가공 깊이 100 μm 이내에서도 바닥면 돌출부가 생기지 않음을 확인시켜 준다.

3.5 가공 깊이의 영향

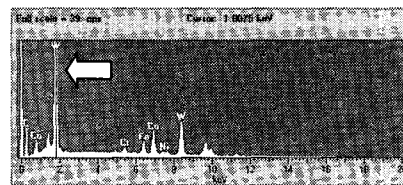
캐비티 가공이 진행되면서 바닥면이 돌출하게 되는 과정을 알아보기 위해 전체 가공 깊이 100 μm 를 다섯 단계로 나누어 20, 40, 60, 80, 100 μm 에서의 바닥면 돌출부를 관찰했다. 실험은 바닥면 돌출부가 가장 선명히 드러나는 한 변이 100 μm 인 정사각형 전극을 이용하여 축전용량 100 pF 에서 수행했다. Figure 8 은 위의 각 깊이에서의 바닥면 형상을 보여주는 SEM 사진이다. (a) 에서 보듯이 가공 초기 20 μm 부분에서 바닥면의 중앙부가 용기된 형상을 볼 수 있다. 중앙 돌출부에 대한 성분 분석 결과 텅스텐이 다량 검출된 것으로 볼 때 가공 부스러기가 용착된 것임을 알 수 있다. 가공이 진행되면서 가공 부스러기가 용착된 중앙부와 가장자리의 높이차는 점점 커지게 되고 이로 인해 바닥 돌출부가 선명히 드러난다. 그러나 깊이가 깊어질수록 용착된 가공 부스러기는 조금씩 줄어들며 가공이 완료된 바닥면에는 전혀 남아있지 않은 것을 볼 수 있다.



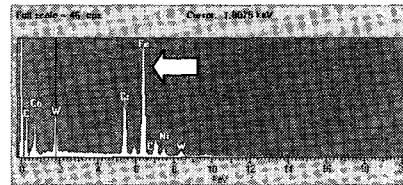
(e) 100 μm machining depth, 852.07 sec machining time

Fig. 8 Bottom surface according to machining depth

Figure 9 는 깊이 20 μm 에서 중앙 돌출부와 가장자리 부분의 성분 분석 결과를 보여준다. 중앙부 (a) 가 가장자리 (b) 에 비해 W 의 비율이 높은 것을 알 수 있으며, 가장자리가 중앙부에 비해 Fe 의 비율이 높은 것을 확인할 수 있다. 전극의 재질이 WC 이고 공작물의 재질이 304 SS 이므로 전극 마모에 의한 가공 부스러기가 중앙부에 용착한다는 것을 뒷받침하는 결과이다.



(a) center of bottom surface



(b) boundary of bottom surface

Fig. 9 EDS spectra of bottom surface at 20 μm machining depth

4. 분석 및 토의

4.1 전극 마모와 바닥면 왜곡

이상의 실험 결과를 토대로 전극 마모 및 바닥면의 형성 과정을 설명하면 다음과 같다. 먼저 모서리 부분의 방전 집중에 의하여 전극의 가장자리가 마모된다. 그리고 전극의 중앙부는 가장자리에 비하여 가공 부스러기의 배출이 어려우므로 전

극 마모로 인한 가공 부스러기가 중앙부에 쌓이며 융착한다. 이렇게 융착된 가공 부스러기는 전극의 바닥 부분을 마모 시킴과 동시에 중앙부의 방전 가공을 방해하여 바닥면에 돌출부를 형성하게 한다. 가공이 진행되면서 전극의 모서리 가공은 계속되고 모서리 가공이 어느 정도 진행된 후에는 모서리 부분보다 전극의 중앙부가 가공물과 가까워지므로 중심부 가공이 시작된다. 중심부 가공이 시작되면서 융착된 가공 부스러기는 깎여 나가게 되고 왜곡된 전극과 가공물의 중앙부의 마모가 진행되면서 점차 반구형의 형상을 가지게 된다. Figure 10 은 가공 초기 전극 마모와 가공 부스러기 융착에 의한 전극 형상 왜곡 과정을 나타내고 있다. 이러한 전극 마모와 바닥면 가공 과정에 대한 설명을 뒷받침하기 위해, 직경 100 μm 의 전극으로 20 μm 에서 100 μm 까지 깊이별로 가공을 한 후에 전극의 바닥면을 살펴보는 실험을 수행했으며 그 결과를 Fig. 11 에 나타냈다. 전극의 형상과 그 때의 가공물 바닥면을 동시에 관찰하였다. 가공이 진행되면서 가공물의 바닥면이 돌출하게 되고 그로 인해 전극 중앙 부위가 패이는 것을 확인할 수 있으며, 또한 전극의 모서리부 역시 예상했던 형상으로 마모되는 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 10 에서 가정한 가공 초기의 전극 바닥면 왜곡 현상에 대한 설명과 일치한다.

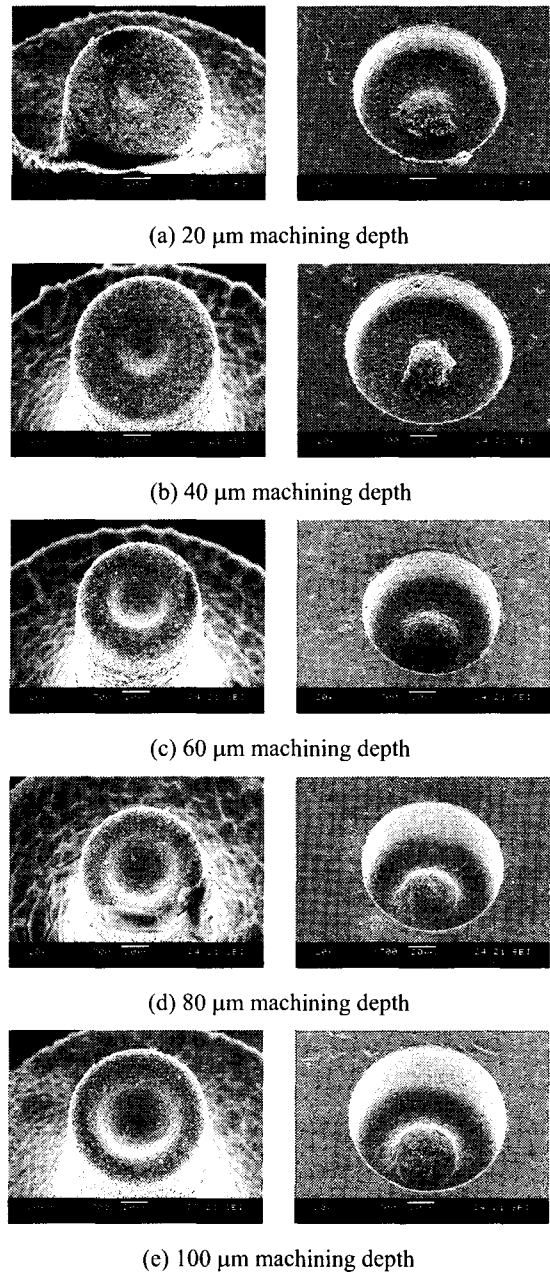
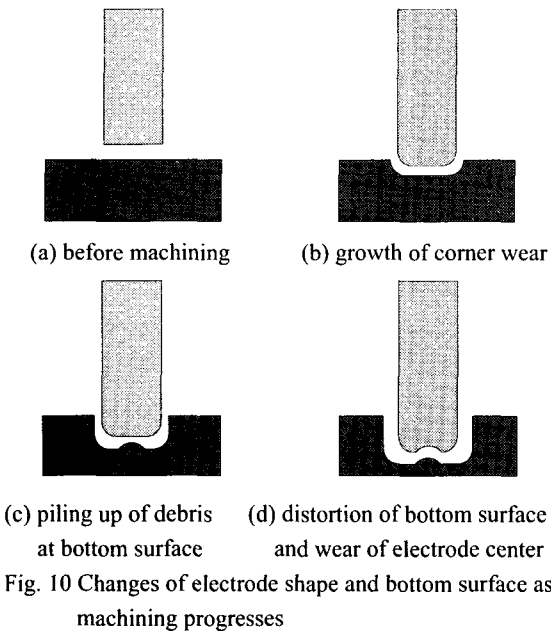


Fig. 11 Bottom shapes of electrode and machined cavity according to machining depth

4.2 바닥면 왜곡의 방지

미세 캐비티 가공 시에 축전 용량과 전극 직경의 크기에 따라 전극과 가공물의 바닥면 형상 왜곡 유무가 결정된다. 이러한 왜곡 현상을 피하

기 위해서는 축전 용량을 높이고 전극 직경을 작게 하면 되지만, 전극 직경은 캐비티의 크기에 의해 정해지므로 축전 용량을 높이는 방법을 사용해 야한다. 그러나 높은 축전 용량에서는 캐비티의 표면 품질이 좋지 않으므로, 이를 개선하기 위한 방법을 제안했다. 한 변이 100 μm 인 정사각형 캐비티를 가공하기 위해서 한 변이 80 μm 인 전극을 제작하여 바닥면 왜곡이 일어나지 않는 3000 pF 의 축전 용량으로 최종 가공 깊이까지 일차 가공 하고, 일차 가공이 끝난 후 축전 용량을 100 pF 으로 바꾸고, 가공 여유를 고려하여 좌우 상하 방향으로 각각 5 μm 씩 전극을 이송하며 가공하였다. Figure 12 는 실험 과정에 대한 개념도이며, 최종적으로 얻어진 캐비티 형상은 Fig. 13 과 같다.

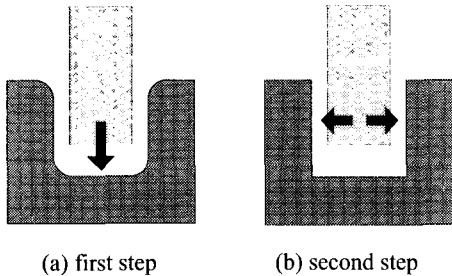


Fig. 12 Method for prevention of bottom surface distortion

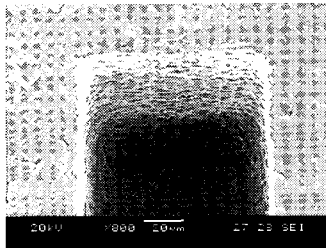


Fig. 13 Micro cavity without bottom surface distortion. (92.0 \times 93.7 μm^2 cavity, 100 μm machining depth, and 479.1 sec machining time)

5. 결론

미세 방전 가공에서 전극의 초기 형상 변화를 분석함으로써 캐비티 가공 시 바닥면 형상이 왜곡 되는 원인과 과정을 고찰하였으며 이의 해결 방안을 제시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 방전 초기에 전극 모서리부의 전자 밀집 현상에 의해 방전 집중이 일어나 전극 가장자리 마모가 빨리 진행된다.

2) 중앙부에서는 가공 부스러기의 순환이 원활하지 못하므로 가공 부스러기의 용착이 일어나서 캐비티의 중앙부 형상을 왜곡시킨다. 이는 방전 회로의 축전 용량을 증가시킴으로써 그 영향을 줄일 수 있다.

3) 가공이 진행되면서 측면 마모량은 점점 증가하게 되고 이로 인해 전극과 공작물 사이의 간극이 가까운 중앙부에서 가공이 활성화된다. 따라서 캐비티의 중앙 돌출부와 전극 중앙부의 마모가 진행되어 전극 형상의 안정화가 시작된다. 이때 전극의 크기가 작아질수록 동일한 축전 용량에서 마모량이 크므로 안정화가 더욱 빨리 진행된다.

4) 제작하고자 하는 미세 캐비티의 70 ~ 80 % 크기의 전극으로 바닥면 왜곡이 일어나지 않는 높은 축전용량에서 황삭 가공을 한 후에, 낮은 축전 용량으로 마무리 가공을 함으로써 캐비티의 표면 품질을 유지하면서 바닥면 돌출 현상의 방지가 가능하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Sato, T., Nontraditional Machining, Yokendo, Tokyo, 1994.
2. Masuzawa, T., Fujino, M., Kobayashi, K., "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34, pp. 424-431, 1985.
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 Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 94-100, 1999.
4. Kunieda, M., "Challenges in EDM Technology," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 33, pp. 276-282, 1999.
5. Yu, Z., Masuzawa, T., and Fujino, M., "3-D Micro-EDM with Simply Shaped Electrode (2nd Report)," Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers, Vol. 31, pp. 14-22, 1997.