

탈이온수를 이용한 미세 방전 밀링

정도관*, 김보현#, 주종남*

Micro Electrical Discharge Milling Using Deionized Water

Do Kwan Chung*, Bo Hyun Kim[#] and Chong Nam Chu*

ABSTRACT

In this paper, micro electrical discharge milling using deionized water as dielectric fluid was investigated. In EDM, dielectric fluid is an important factor which affects machining characteristics. When deionized water was used as dielectric fluid, machining characteristics were investigated according to voltage, capacitance, and resistivity of deionized water. Machining gap increased with increasing voltage and capacitance. As the resistivity of deionized water decreased, the machining gap increased. The wear of a tool electrode and machining time can be reduced by using deionized water instead of EDM oil. Surface roughness was also improved when deionized water was used.

Key Words : Micro EDM(미세 방전 가공), Micro Electrical Discharge Milling(미세 방전 밀링), Deionized water(탈이온수)

1. 서론

최근 전자, 통신, 반도체 등의 전자 제품의 발달과 더불어 초소형, 고정밀의 기계 부품의 수요도 증가하고 있다. 이와 함께 미세 기계 부품 또는 미세 금형 제작을 위한 미세 가공 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 미세 부품 가공은 고강도의 금속을 높은 가공 정밀도로 가공해야 하므로 기존 절삭 가공 방법과는 다른 여러 특수 가공법들이 개발되어왔다. 한편 미세 방전 가공(micro electrical discharge machining, micro EDM)은 재료의 기계적 강도에 무관하게 수 마이크로 미터 크기의 형상까지 가공 할 수 있기 때문에 고강도

금속 재료의 미세 가공 기술로서 최근 주목을 받고 있다.

미세 방전 가공은 와이어 방전 가공을 이용한 미세 전극 제작 기술이 개발된 이래 미세 공구 전극을 이용하여 미세 구멍 가공이나 3 차원 미세 형상을 가공할 수 있게 되었다.^{1,3} 이에 따라 미세 방전 가공의 정밀도와 효율성 향상을 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 방전 가공 시 발생하는 전극 마모에 의한 형상 오차 보정, 절연액 및 가공 조건에 따른 효율 향상 등에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다.^{2,6} 일반적으로 방전 가공에서는 절연액으로 방전 가공유나 탈이온수(deionized water)를 사용한다. 방전 현상은 절연액 안에서 발

접수일: 2005 년 10 월 28 일; 게재승인일: 2006 년 2 월 10 일

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

교신저자: 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

E-mail ssborry@plaza1.snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147

생하므로 절연액에 따라 가공 특성이 달라진다.

Masuzawa² 는 탈이온수를 절연액으로 이용, 깊은 구멍 가공을 하고 가공 효율을 높일 수 있음을 보였다. 하지만 3 차원 형상 가공이나 미세 금형 가공을 위해서는 미세 방전 밀링에서의 탈이온수의 효과에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 탈이온수를 미세 방전 밀링에 적용하여 그 가공 특성을 실험적으로 살펴 보았다. 전압, 축전용량, 탈이온수의 비저항 등의 조건에 따라 미세 홈 (micro groove)을 가공하여 가공 간극의 변화를 살펴보았다. 또한 탈이온수와 방전 가공유를 사용하는 경우에 대하여 가공 간극, 전극 마모량, 가공 속도, 가공 표면 형상 등을 비교하였다.

2. 미세 방전 가공

2.1 미세 방전 가공 시스템

미세 방전 가공 시스템의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다. 그림과 같이 공작물을 X, Y 축 이송 스테이지 위에 위치시키고, 공구 전극은 Z 축 스테이지 위에 위치시켰다. 공구 전극과 공작물에는 방전 회로를 통해 각각 (-)극과 (+)극이 연결된다.

방전 회로는 RC 회로를 사용하였다. RC 방전 회로는 펄스폭과 방전 주기의 비로 정의되는 충격 계수(duty factor)가 낮기 때문에 가공 속도가 느리고 전극 소모가 크지만 방전주파수(discharge frequency)와 방전 전류 피크치가 높고 펄스 폭을 짧게 하는 것이 용이하여 작은 단발 방전 에너지가 필요한 미세 가공에 적합한 회로이다.⁷

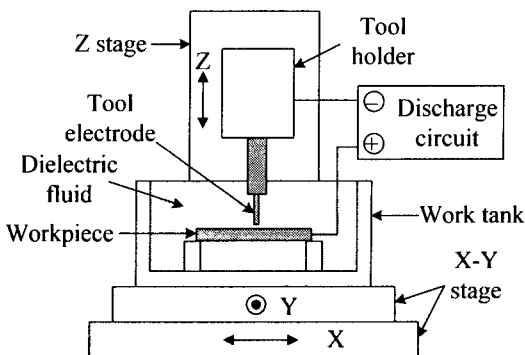
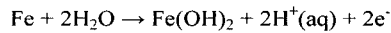
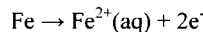


Fig. 1 Micro EDM system

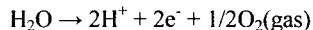
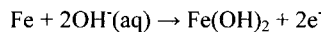
2.2 절연액

방전에 의해 발생한 고온의 열로 녹은 가공물의 표면은 절연액에 의해 급속히 냉각되고 재응고 된다. 절연액에 따라 열전도율과 구성 성분이 다르므로 가공물의 가공 특성은 절연액의 종류에 따라 달라진다. 일반적으로 사용되는 절연액인 방전 가공유의 경우, 방전으로 인해 탄소(carbon)가 발생하며 이는 방전을 불안정하게 하는 요인이 된다 또한 발화의 위험이 있으므로 방전 가공 시 주의 를 요구한다.²

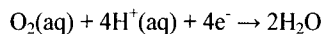
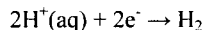
한편 절연액으로 탈이온수를 사용하는 경우 탄소가 발생하지 않아 가공이 안정적으로 이루어 지고 가공 속도 또한 빨라지는 장점이 있다.^{2,8} 하지만 절연액의 비저항이 상대적으로 낮기 때문에 방전 개시 거리가 증가하게 되므로 가공 간극이 커지고 가공 정밀도도 낮아지게 된다.^{8,9} 또한 전기 화학적 반응으로 가공물 표면에 작은 구멍(pit) 이나 전해(dissolution)가 일어난다. (+)극인 가공물 에서 일어나는 반응은 다음과 같다.⁹(Fe 의 경우)



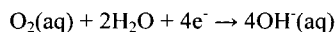
or



(-)극인 전극에서는 가공물의 산화 반응에 대응하는 환원 반응이 일어난다.



or



3. 미세 방전 밀링

3.1 탈이온수를 이용한 미세 방전 밀링 특성

전압, 축전 용량, 비저항 등의 가공 조건에 따라 Fig. 2 와 같은 미세 홈을 가공하여 탈이온수를 절연액으로 사용한 방전 밀링의 가공 특성을 살펴 보았다. 미세 홈은 길이 1000 μm, 깊이 105 μm 이며, 깊이 5 μm 씩 가공했다. 본 논문에 언급된 미세 홈은 모두 위와 동일한 조건으로 가공하였다. 실험에 사용한 공구 전극의 재료는 텅스텐카바이

트(WC)이고, 공작물 재료는 스테인리스 강(STS 304)을 사용하였다.

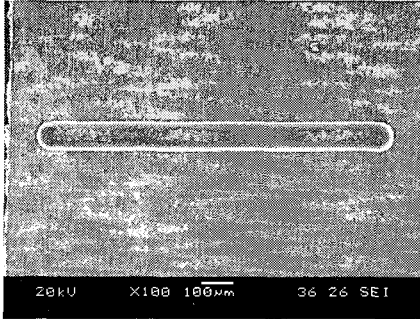


Fig. 2 Micro groove machined by micro electric discharge milling (STC 304, deionized water)

3.1.1 전압의 영향

탈이온수를 절연액으로 사용한 경우, 전압에 따른 가공 간극의 변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 직경 50 μm 의 공구 전극으로 미세 홈을 가공하여 너비 방향 가공 간극을 측정하였다. 전압은 40~100 V 를 사용하였고, 축전 용량은 400 pF 로 설정하였다. 사용된 탈이온수의 비저항은 2.5 M Ωcm 이다. Fig. 3 과 같이 전압이 증가할수록 미세 홈의 가공 간극이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 전압이 증가할수록 방전 에너지가 커지며 이와 동시에 전해 반응도 증가하기 때문이다. 40 V 조건에서 간극이 8.5 μm 로 가장 작다. 일반적으로 가공유를 사용하는 미세 방전의 경우 60~80 V 이상의 전압을 사용한다. 하지만 탈이온수를 사용한 방전 밀링의 경우는 40 V 에서도 작은 가공 간극을 유지하면서 안정적으로 가공할 수 있었다. 40 V 이하의 조건에서는 전기적 단락이 많이 발생하는 등 가공이 원활히 이루어지지 않음을 실험적으로 확인하였다.

3.1.2 축전용량의 영향

축전 용량에 따른 가공 간극의 변화를 Fig. 4 에 나타내었다. 직경 50 μm 의 공구 전극으로 미세 홈을 가공하여 너비 방향의 가공 간극을 측정하였다. 전압은 40 V 을 사용하였으며 탈이온수의 비저항은 2.5 M Ωcm 이다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 축전 용량이 증가할수록 가공 간극도 증가한다. 축전 용량을 늘리면 방전 에너지가 증가하지만 그 영향은 전압을 증가시킬 때보다는 약한 것을 알 수 있다. 이는 전압을 증가시킬 때는 방전 에너지뿐만 아니라

라 전해 반응도 크게 일어나지만 축전 용량의 증가는 전해 반응에 영향을 미치지 못하기 때문이다. 50 pF 의 조건에서 가공 간극이 가장 작지만 이 조건에서는 가공 중 전기적 단락이 많이 발생하는 등 가공이 불안정해지고, 가공된 표면 형상이 고르지 못하였다. 따라서 안정한 가공과 가공 간극을 고려할 때 400 pF 가 적절한 가공 조건이라고 판단된다.

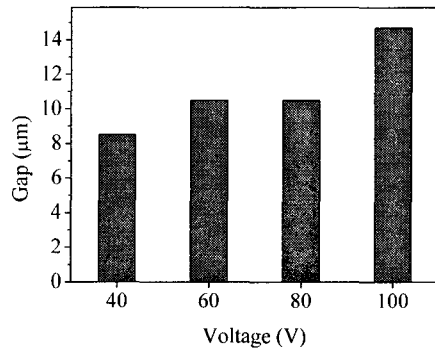


Fig. 3 Machining gap according to voltage (\varnothing 50 μm tool electrode, 400 pF, 2.5 M Ωcm)

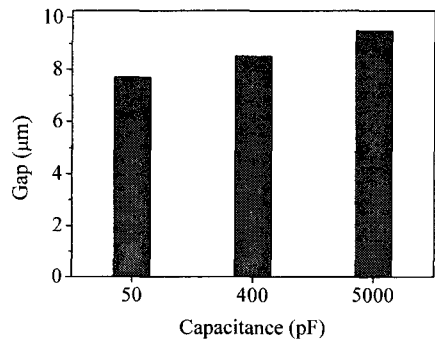


Fig. 4 Machining gap according to capacitance (\varnothing 50 μm tool electrode, 40 V, 2.5 M Ωcm)

3.1.3 탈이온수의 비저항의 영향

탈이온수를 이용한 방전 가공에서 탈이온수의 비저항이 낮아지면 절연액의 절연 파괴가 쉽게 일어나 방전이 일어나기 쉽고, 전해 작용도 증가하므로 가공 간극이 넓어지게 된다.

본 논문에서는 Fig. 5 와 같이 각기 다른 비저항의 탈이온수를 사용한 경우에 대해 그 가공 특

성을 비교하였다. 40 V, 400 pF 의 조건에서 미세 홈 가공 시 탈이온수의 비저항이 12 MΩcm 로 높은 경우 가공 간극이 5.1 μm 이었으며 비저항이 0.01 MΩcm 로 낮아지면 가공 간극은 약 50 μm 로 급격히 증가하였다.

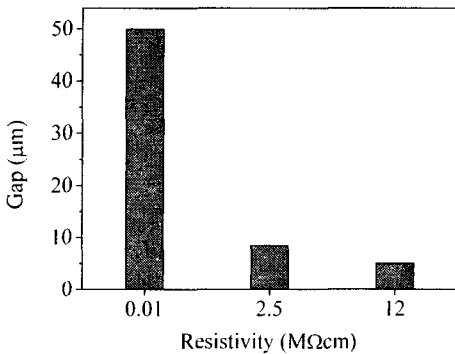
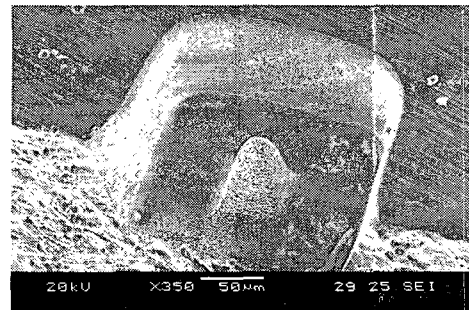


Fig. 5 Machining gap according to resistivity of deionized water (40 V, 400 pF)

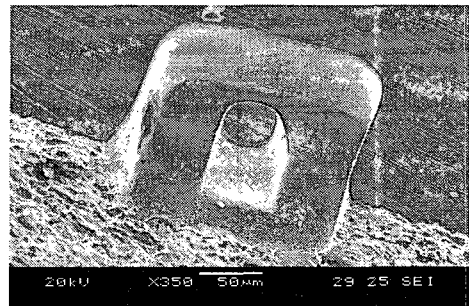
이와 같이 가공 간극이 탈이온수의 비저항에 따라 변화하므로 3 차원 형상을 가공할 때 비저항이 형상 오차에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 6 과 같이 비저항 0.1, 2, 15 MΩcm 인 탈이온수를 사용하여 수직 벽을 가공한 뒤 형상의 왜곡 정도를 보았다. 미세 형상은 깊이 5 μm 씩 가공하여 초기 가공 층은 마지막 가공층 보다 가공 간극이 증가하게 된다. 따라서 Fig. 6(a)에서 볼 수 있는 것과 같이 비저항이 낮으면 방전 개시 거리가 증가하고 전해 반응이 증가하여 수직 벽이 테이퍼 형상을 보이게 된다. 반면, 비저항이 높아지면 Fig. 6(c)와 같이 방전 개시 거리는 감소하고 전해 반응이 억제되어 가공 간극이 줄어들고 정밀한 가공 형상을 얻을 수 있다. 하지만 이 때 전극의 마모도 증가하게 되어 이에 대한 보정이 필요하다. 따라서 전해 반응과 전극의 마모로 인한 오차를 고려하여 가공 조건을 선정해야 한다.

탈이온수를 절연액으로 사용하면 가공 시 공구 전극에 금속의 산화 물질이 (-)극인 전극에 붙게 된다. 비저항이 낮아질수록 공구 전극에 부착되는 산화 물질의 양은 늘어난다. Fig. 7은 가공 후 공구 전극과 전극에 부착된 물질의 성분을 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)로 분석한 결과를 보여주고

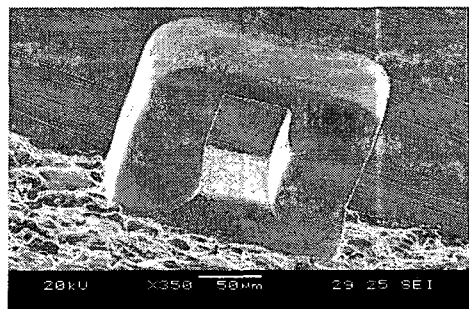
있다. Fig. 7(b)에서 알 수 있는 바와 같이 공구 전극에 부착된 물질은 가공물인 스테인리스 강의 성분과 같은 Fe, Cr, Ni 이 주성분이며 산소도 검출되었는데 이것은 전해작용의 결과로 공구 전극에 Fe, Cr, Ni 등이 산소와 함께 산화되어 부착된 것이다. 이 산화물은 전도성을 띠지 않아 형상 정밀도에는 영향을 미치지 않으며 초음파 진동을 가하면 쉽게 제거되었다.



(a) 0.1 MΩcm

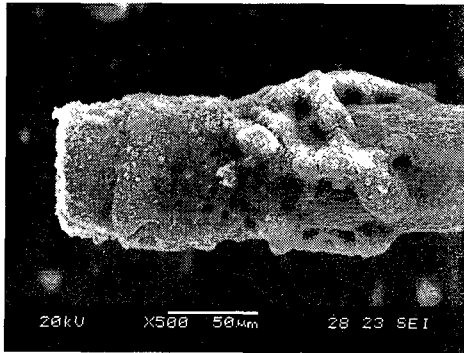


(b) 2 MΩcm

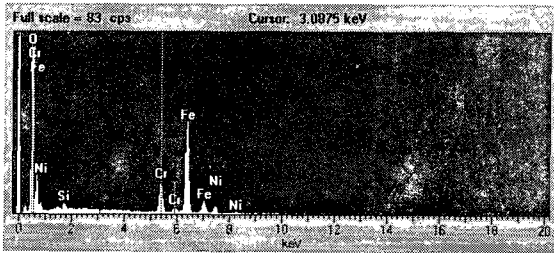


(c) 15 MΩcm

Fig. 6 Vertical wall machined by micro electric discharge milling according to resistivity of deionized water (40 V, 400 pF)



(a)



(b)

Fig. 7 (a) SEM image of the tool electrode after micro electrical discharge milling and (b) EDS analysis of the tool electrode

3.2 방전 가공유와 탈이온수의 비교

절연액으로 가공유 (EDM-100, 범우 화학)를 사용하는 경우와 탈이온수를 사용하는 경우의 가공 특성을 Table 1 에 나타내었다. 미세 홈을 가공하여 이송 속도와 가공 간극, 전극의 마모를 비교하였다. 최대 이송 속도 (maximum feedrate)는 전극이 이송 하면서 가공을 할 때 단락이 발생하지 않고 가공이 원활이 진행되는 최대 속도를 나타낸다. 사용된 탈이온수의 비저항은 2.5 MΩcm 이다.

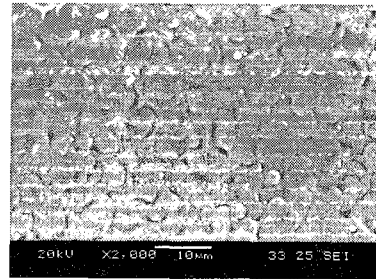
Table 1 에서, 탈이온수를 사용하는 경우의 최대 이송속도는 가공유를 사용하는 경우보다 약 3 배 정도 빠르다는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한 전극 마모량은 약 90% 이상 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 탈이온수를 절연액으로 사용하면 방전 개시 거리의 증가와 가공유와는 달리 탄소가 발생하지 않는 점 등을 원인으로 들 수 있다.

가공 표면 거칠기를 보기 위하여 표면 측정기 (Talysurf, Taylor-Hobson, Co.)를 이용하여 표면 거칠기를 측정하였다. Fig. 8 과 동일한 조건에서, 가공유를 사용한 경우는 $R_{max} = 0.95 \mu\text{m}$ 이고 탈이온수를

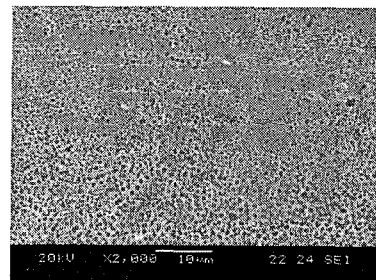
사용한 경우는 $R_{max} = 0.66 \mu\text{m}$ 이었다. 따라서 표면 거칠기는 탈이온수를 사용한 경우가 가공유보다 더 좋은 것을 알 수 있다.

Table 1 Machining characteristics according to dielectric fluids

Dielectric Fluid	EDM oil	Deionized Water (2.5 MΩcm)	
		100 V	40 V
Voltage	100 V	100 V	40 V
Capacitance	400 pF	400 pF	400 pF
Max. Feedrate	10 μm/s	32 μm/s	25 μm/s
Gap	5 μm	14.7 μm	8.5 μm
Tool Wear	93 μm	3.5 μm	4.5 μm



(a) EDM oil (80 V, 400 pF)



(b) Deionized water (40 V, 400 pF, 2.5 MΩcm)

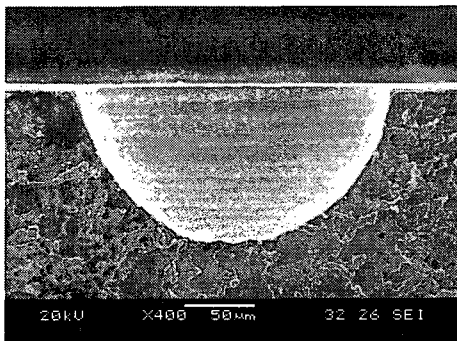
Fig. 8 Surface profiles of grooves machined by micro EDM using EDM oil and deionized water

3.3 미세 반구 형상 가공

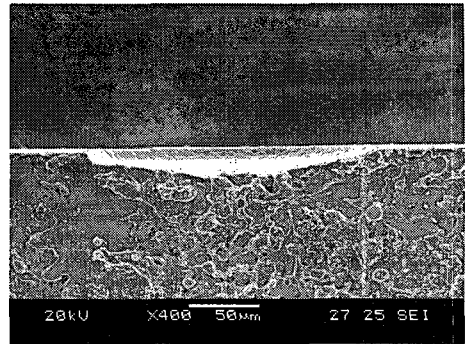
미세 방전 가공에서는 전극의 마모 때문에 정밀한 3 차원 형상을 가공하기 위해서는 전극의 마모를 보정해주어야 한다. 하지만 탈이온수를 사용하면 전극의 마모를 상당히 줄일 수 있기 때문에 전극 마모 보정량이 작아진다. 또한 가공 속도가

빠르기 때문에 가공 시간을 줄일 수 있다. 따라서 탈이온수를 사용하면 가공유를 사용하는 경우에 비해 가공 정밀도 및 효율성을 높일 수 있다. 이를 비교하기 위하여 Fig. 9 에 가공유와 탈이온수를 사용하여 가공한 미세 반구 형상을 나타내었다.

가공 조건은 Table 2 와 같다. 탈이온수의 경우는 가공 조건으로 가공 간극이 작고, 가공이 안정적으로 이루어지는 2.5 MΩcm, 40 V, 400 pF 을 사용하였다. 가공유의 경우는 100 V, 400 pF 의 조건을 사용하였다. 두 경우 모두 공통적으로 23 μm 의 직경의 공구 전극을 사용하였고, 반지름이 100 μm 인 미세 반구 형상을 가공하였다. 미세 홈 가공 때와 마찬가지로 깊이 5 μm 씩 한층 씩 가공하였다. 두 경우 모두 전극 마모량을 보정하지 않았다. 가공 속도는 탈이온수의 경우 15 μm/s 이고, 가공유는 7 μm/s 이다. Fig. 9(a) 에 나타난 것과 같이 탈이온수를 사용한 경우는 공구 전극의 마모량이 적어 반구 형상에 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 가로 방향의 반구 직경이 222 μm 로 가공 간극이 11 μm 이다. 깊이 방향의 가공 깊이는 중심부가 109 μm 이다. 반면 Fig. 9(b) 의 가공유를 사용한 경우는 공구 전극의 마모량이 많아 깊이 방향으로 가공이 거의 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 가로 방향의 반구 직경은 204 μm 로 가공 간극은 2 μm 이다. 하지만 깊이 방향으로 가공된 깊이는 중심부가 17.5 μm 로 전극의 마모량이 매우 많아 형상 오차가 매우 큰 것을 알 수 있다.



(a) Deionized water



(b) EDM oil

Fig. 9 Hemispherical shape machined by micro electrical discharge milling (STS 304)

Table 2 Machining conditions of hemispherical shape

Dielectric fluid	EDM oil	Deionized Water (2.5 MΩcm)
Voltage	100 V	40 V
Capacitance	400 pF	400 pF
Tool Dia.	23 μm	23 μm
Feedrate	7 μm/s	15 μm/s

4. 결론

본 논문에서는 탈이온수를 절연액으로 사용한 미세 방전 밀링의 가공 특성을 살펴보고, 방전 가공유를 사용하는 경우와 비교하였다. 실험을 통해 얻은 적절한 조건으로부터 미세 반구 형상을 가공하여 가공 효율성을 비교하였다. 이와 같은 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 미세 방전 가공에서 탈이온수를 절연액으로 사용하는 경우에 전압, 축전 용량이 커지면 가공 간극이 커진다. 실험 결과로부터, 미세 방전 밀링의 경우 가공 간극이 가장 작고, 안정적으로 가공이 이루어지는 조건은 40 V, 400 pF 이다. 비저항은 높을수록 가공 간극이 작아진다.

2. 탈이온수를 사용하는 경우에 방전 가공 전해 작용으로 가공 표면에 미세한 구멍(pit)이 생긴다. 표면 거칠기는 탈이온수를 사용하는 경우가 가공유를 사용하는 경우보다 좋다.

3. 탈이온수를 절연액으로 사용하면 가공유에 비해 가공 간극은 크지만, 가공 속도는 빠르고 공구 전극 마모량은 적다. 따라서 방전 밀링으로 미세 형상을 가공할 때 탈이온수를 사용하면 가공유를 사용하는 경우보다 가공 정밀도 및 효율성이 높다.

참고문헌

1. Masuzawa, T., Fujimoto, M. and Kobayashi, K., "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 1, pp. 431-434, 1985.
2. Masuzawa, T., Tsukanoto, J. and Fujimoto, M., "Drilling of Deep Microholes by EDM," Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 195-198, 1989.
3. Yu, Z. Y., Masuzawa, T. and Fujino, M., "Micro-EDM for Three-Dimensional Cavities - Development of Uniform Wear Method-," Annals of the CIRP, Vol. 47, No. 1, pp. 169-172, 1998.
4. Chen, S. L., Yan, B. H. and Huang, F. Y., "Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, pp. 107-111, 1999.
5. Kunieda, M. and Masuzawa, T., "A Fundamental Study on a Horizontal EDM," Annals of the CIRP, Vol. 37, pp. 187-190, 1988.
6. Masuzawa, T. and Tanaka, K., "Water-Based Dielectric Solution for EDM," Annals of the CIRP, Vol. 32, pp. 119-122, 1983.
7. Cho, P. J., Yi, S. M., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Characteristics of RC Circuit with Transistors in Micro-EDM," Journal of the KSPE, Vol. 21, No. 12, pp. 44-51, 2004.
8. Masuzawa, T., "State of the Art of Micromachining," Annals of the CIRP, Vol. 49, pp. 473-488, 2000.
9. Sato, T., "Nontraditional machining," Yokendo, 1994.
10. Kim, B. H., "Taper Reduction by Disk-type Electrode in Micro Electrochemical Machining," Ph. D dissertation, Seoul National University, 2005.