

방전 가공과 전해 가공을 이용한 미세 가공

전동훈*, 김보현#, 주종남**

Micro Machining by EDM and ECM

Dong Hun Jeon*, Bo Hyun Kim# and Chong Nam Chu**

ABSTRACT

Micro electrical discharge machining (EDM) and micro electrochemical machining (ECM) were studied for the fabrication of micro structures. Micro EDM has been used to machine micro structures from metals. However, since the tool wear is inevitable during the machining, the tool wear is drawback for the precision machining. Micro ECM is also used for micro machining and produces better surface quality than that of micro EDM. Moreover, since tool electrodes are not worn out, micro ECM is suitable for the precision micro machining. However, the machining rate is lower than that of micro EDM. In this paper, therefore, the hybrid machining process which uses micro EDM as roughing and micro ECM as finishing is introduced. By using this hybrid machining, a hemisphere with 100 μm radius was fabricated and the efficiency of the process was investigated experimentally.

Key Words : Micro Machining (미세 가공), Electrical Discharge Machining (방전 가공), Electrochemical Machining (전해 가공), Hybrid Process (복합 가공)

1. 서론

최근 반도체 산업과 초소형 시스템 구현 기술이 크게 발전하면서 3 차원 미세 형상 가공에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 지금까지의 3 차원 미세 형상 가공 기술은 접근 방식에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 반도체 공정 기술을 2 차원에서 3 차원으로 확장한 방법이 그 중 하나이다. 이것은 고정밀 미세 형상 제작과 대량 생산이 용이한 장점이 있으나 고가의 설비를 요구하고 가공할 수 있는 재료가 제한되어 있으며 이방성 식각

기술의 높이 방향으로의 단순한 확장이므로 완전한 3 차원 형상 가공에는 한계가 있다. 한편, 다이아몬드 선삭, 미세 방전 가공, 미세 전해 가공, 초음파 가공, 미세 드릴링 등 기존 절삭 가공과 특수 가공이 또 하나의 방법으로 이용되고 있다. 이중 미세 방전 가공과 미세 전해 가공은 와이어 방전 가공을 이용한 미세 전극 제작 기술이 개발된 이래 미세 형상의 효과적인 가공법으로 응용되고 있다.¹

미세 방전 가공은 재료의 강도와 무관하게 금속을 가공할 수 있고 미세 전극을 이용하여 3 차

접수일: 2006 년 7 월 11 일; 게재승인일: 2006 년 8 월 18 일

* S-Oil 주식회사

교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

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

** 서울대학교 기계항공공학부

원 미세 형상 가공이 가능하나 전극 마모가 발생하므로 마모량을 고려한 형상 오차 보정이 필요하다.² 한편 미세 전해 가공은 초단 펄스 전원을 이용하여 전해 영역을 국부화함으로써 가공 간극을 수 마이크로 이내로 조절할 수 있고,³ 전극 마모가 없어서 정교한 형상 가공이 가능하며 표면 조도도 우수하다. 그러나 방전 가공에 비해 가공 속도가 낮은 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 상대적으로 가공 속도가 빠른 방전 가공을 황삭 공정으로 사용하고 전극 마모 보정이 필요 없고 표면 조도가 좋은 전해 가공을 정삭 공정으로 이용하는 방전/전해 복합 가공 프로세스를 3 차원 미세 형상 가공에 적용하였다. 또한 방전 가공, 전해 가공 그리고 복합 가공의 가공 특성을 정량적으로 비교함으로써 복합 가공의 가공 성능 향상 여부를 살펴보았다.

2. 미세 방전 가공

2.1 미세 방전 가공 시스템

Fig. 1 은 실험에서 사용한 미세 방전 가공 시스템의 개략도이다. 시스템은 크게 정밀 이송 장치, 공구 전극, 가공물, 방전 회로로 구성된다. 정밀 이송 장치는 X, Y, Z 이송 축으로 0.1 μm 의 분해능을 갖고 A/D 보드가 장착된 컨트롤러에 의해 제어된다. 가공 수조에는 공구 전극과 공작물이 절연액 속에 담겨 있는데 이들은 방전 회로를 통해 각각 (-)극과 (+)극이 연결된다. 방전 회로는 미세 가공에 유리한 RC 회로를 사용하였다.^{1,2}

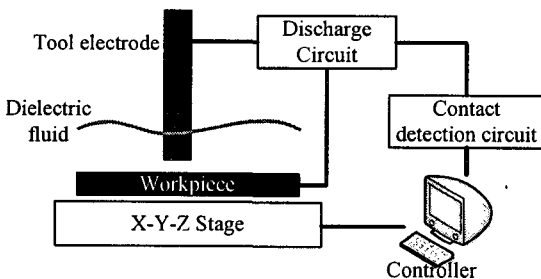


Fig. 1 Micro EDM system

일반적으로 방전 가공에서는 절연액으로 등유(kerosine)나 탈이온수(deionized water)를 사용한다. 등유를 절연액으로 사용하는 경우는 탈이온수를

사용하는 경우에 비해 가공 간극이 작은 반면, 가공 중 탄소가 발생하여 가공을 방해하고,⁴ 전극 마모가 심한 단점이 있다. 이에 반해 탈이온수를 절연액으로 사용하면 전극 마모가 적고, 가공 속도는 빠르지만, 전해 작용의 영향으로 가공 간극이 등유를 사용하는 경우보다 커진다.^{4,5} 탈이온수의 전해 작용은 비저항에 따라 그 정도가 결정되는데, 비저항이 높아지면 전해 효과는 감소한다. 그리고 탈이온수를 절연액으로 사용하면 등유와 달리 같은 가공 수조 내에서 묽은 황산 등의 전해액과 교체하는 것이 용이하므로 방전 가공 후 전해 가공을 수행하는 복합 가공에 유리하다. 따라서 본 실험에서는 탈이온수를 절연액으로 사용하였다.

미세 전극은 방전 가공 도중에 공작물에 접촉하여 부러지거나 휘는 것을 최소화하기 위하여 강성이 우수한 텅스텐 카바이드(WC)를 사용하였으며 와이어 방전 연삭(WEDG) 방법으로 지름을 수십 마이크로까지 가공하여 사용하였다.¹

한편 가공물 재료는 스테인리스 강(STS 304)을 사용하였다. 가공을 시작하기 전에 공작물과 전극을 전기적으로 접촉시켜 상대적 위치를 측정하고, 전극이 지정된 지점에서 깊이 5 μm 씩 내려가면서 가공 경로에 따라 이송되는 방식으로 가공을 수행하였다. 이러한 다층 가공(layer-by-layer machining)은 전극의 파손을 막고 일정 가공 속도를 유지하면서 3 차원 미세 형상 가공을 수행하는데 도움을 준다.

2.2 미세 방전 가공의 가공 특성

미세 방전 가공의 가공 성능을 조사하기 위해 우선 일정 가공 조건에서의 최대 이송 속도(maximum feed rate)를 측정하였다. 최대 이송 속도는 전극이 이송하면서 가공을 할 때 단락이 발생하지 않고 가공이 원활히 진행되는 최대 속도를 나타낸다. 또한 탈이온수를 절연액으로 이용한 방전 가공의 경우 탈이온수의 비저항에 따라 가공 특성이 차이가 나므로, 비저항에 따른 영향도 살펴보았다. 최대 전극 이송 속도의 측정을 위해 직경 약 70 μm 의 원형 전극을 이용하여 5 μm 의 가공 깊이로 미세 홈을 가공할 때 공작물과 전극의 접촉 빈도를 조사하여 수행하였다. 인가 전압은 40 V로 설정하였다. Table 1 과 같이 비저항이 낮아질수록 가공 속도가 증가함을 알 수 있다. 이는

탈이온수의 비저항이 낮은 경우 방전이 보다 쉽게 일어나고 전해 작용도 더해져서 가공 속도가 상대적으로 더 증가하기 때문이다.

Table 1 Maximum feedrate according to the resistivity of deionized water

Resistivity	Max. Feedrate
15 ~ 18 M Ω ·cm	18 μ m/s
0.5 ~ 3.0 M Ω ·cm	28 μ m/s

탈이온수의 비저항에 따라 가공 시간과 가공 정밀도의 변화를 살펴보았다. Fig. 2 ~ 4 는 미세 원형 전극을 이용한 미세 방전 가공으로 반구 형상을 가공한 결과이다. Fig. 2 는 비저항 15 ~ 18 M Ω ·cm 의 탈이온수를 이용하여 가공한 예이며 가공 시간은 57 분이 소요되었다. 반경 100 μ m 의 반구 형상을 가공 하고자 하였으나 깊이 방향으로 72 μ m 까지만 가공이 되었다. 이것은 전극 마모 영향으로 인한 것이다. Fig. 3 은 비저항이 0.5 ~ 3.0 M Ω ·cm 인 탈이온수를 이용하여 가공한 예이다. 비저항이 낮은 경우 전극 마모량은 감소하고 가공 간극이 증가하여 깊이 방향으로 109 μ m 까지 가공이 되었다. 또한 탈이온수 내의 전해 효과로 인해 가공 형상의 표면 조도가 개선되었고, 이송 속도를 20 μ m/s 로 높여 가공 시간을 42 분으로 단축할 수 있었다. 반면 Fig. 4 는 탈이온수 비저항이 0.01 M Ω ·cm 이하인 경우에 간극이 급격히 증가하여 형상이 왜곡된 결과를 보여준다. 따라서 탈이온수의 비저항이 작아질수록 전극 마모와 가공 속도가 증가하나 가공 간극이 증가하여 형상 정밀도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

3. 미세 전해 가공

3.1 미세 전해 가공 시스템

Fig. 5 는 미세 전해 가공 시스템의 개략도이다. 이 시스템은 크게 정밀 이송 장치, 전해셀 (electrochemical cell), 펄스 발생기로 구성되어 있다. 정밀 이송 장치는 미세 방전 가공 시스템의 것과 동일하며 전극이 이송하는 중에 공작물의 접촉이 발생하면 이송 방향의 반대로 물러나도록 설정하였다. 가공 수조 속의 공구 전극과 공작물은 전해액에 담겨 전해셀을 이룬다. 펄스 발생기를 통해

인가되는 초단 펄스는 전극과 공작물 사이에 연결된 오실로스코프에 의해 모니터링 된다. 스테인리스 강을 전해 가공하는 경우, 부동태 막이 생기지 않도록 전해액과 공작물의 전위를 조절한 뒤 가공하였다.⁶

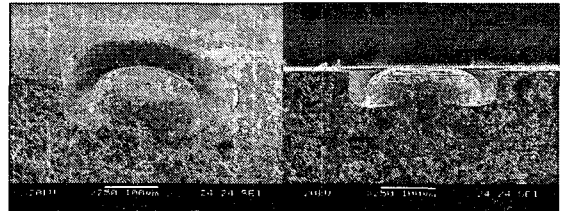


Fig. 2 Micro hemisphere machined by micro EDM with deionized water of high resistivity (15 ~ 18 M Ω ·cm, STS 304, 40 V, \varnothing 54 μ m electrode, 14 μ m/s)

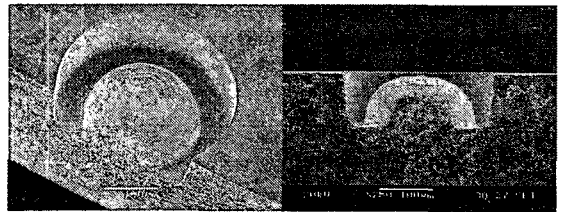


Fig. 3 Micro hemisphere machined by micro EDM with deionized water of low resistivity (0.5 ~ 3.0 M Ω ·cm, STS 304, 40 V, \varnothing 54 μ m electrode, 20 μ m/s)

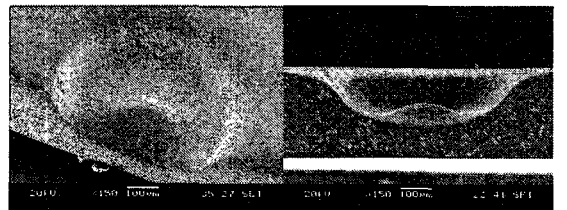


Fig. 4 Micro hemisphere machined by micro EDM with deionized water of very low resistivity (below 0.01 M Ω ·cm, STS 304, 40 V, \varnothing 54 μ m electrode)

전해 가공에서 전해액의 종류와 농도는 표면 조도나 가공 속도 등의 가공 특성에 영향을 미친다. 일반 전해 가공의 경우 스테인리스 강을 높은 가공 속도로 가공하기 위해 농도가 높은 NaCl 용액이 사용되지만 미세 전해 가공에서는 가공 간극, 가공 속도, 표면 조도 등을 고려하여 전해액의 중

류와 농도를 결정해야 한다.⁷ 본 실험에서는 스테인리스 강의 미세 전해 가공을 위해 황산 용액을 사용하였다. 미세 형상 가공을 위해서는 낮은 농도의 전해액이 유리하겠지만 농도가 너무 낮으면 가공 부위에 이온 공급이 부족하여 가공이 원활히 진행되지 않는다. 따라서 가공 간극과 가공 안정성의 양면을 고려하여 0.1 M 황산 용액을 사용하였다.

반구 형상을 가공한 예이다. 진폭 6 V, 주기 1 μ s, 펄스 폭 100 ns, 이송 속도 2.7 μ m/s 의 조건에서 직경 34 μ m 의 전극으로 가공하였다. 미세 방전 가공의 경우보다 표면 조도가 향상된 것을 확인할 수 있다. 하지만 가공 시간이 약 420 분으로 미세 방전 가공으로 비슷한 형상을 가공했을 때의 가공 시간보다 약 10 배 이상 소요되었다.

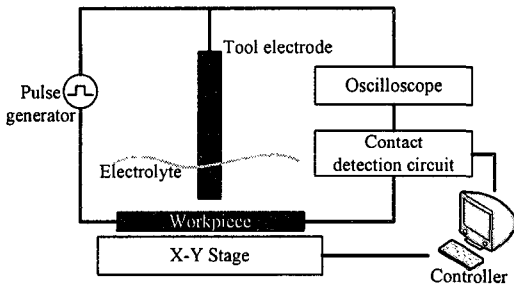


Fig. 5 Micro ECM system

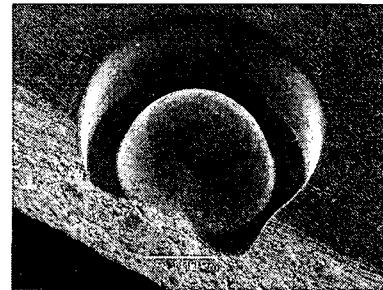


Fig. 6 Micro hemisphere machined by micro ECM (STS 304, 100 μ m radius, \varnothing 34 μ m electrode, 6 V, 1 μ s period, 100 ns pulse on-time, 2.7 μ m/s feed rate)

3.2 미세 전해 가공의 가공 특성

미세 전해 가공은 미세 방전 가공과 같이 정밀 이송 장치를 사용하여 단순 원형 전극으로 3 차원 미세 형상을 제작하는데 응용될 수 있다. 공구 형상을 전사시키는 형태의 형조 전해 가공은 전사 가능한 크기의 제한이 있으므로, 보다 정밀하고 복잡한 미세 형상 가공을 위해 초단 펄스를 부가하여 단순 전극으로 가공하는 방식이 유리하다. 또한 방전 가공과 달리 전극의 마모가 없으므로 높은 형상 정밀도를 유지할 수 있다.⁸

미세 전해 가공의 가공 성능을 알아보기 위해 미세 방전 가공에서와 같은 방식으로 최대 이송 속도를 조사하였다. 직경 약 70 μ m 의 원형 전극을 이용하여 스테인리스 강에 미세 홈을 가공하였으며 가공물과 공구 전극의 접촉 빈도를 관찰하여 최대 이송 속도를 결정하였다. 미세 전해 가공이 미세 방전 가공과 비교하여 재료 제거율 (material removal rate)이 상대적으로 작으므로 절삭 깊이를 3 μ m 로 줄였다. 펄스 진폭 6 V, 펄스 휴지 전위 600 mV, 주기 1 μ s, 펄스 폭 100 ns 의 펄스 조건에서 최대 이송 속도는 3.5 ~ 4.5 μ m/s 정도로 나타났다. 미세 방전 가공에 비해 절삭 깊이가 작음에도 불구하고 최대 이송 속도가 상당히 낮음을 알 수 있다.

Fig. 6 은 미세 전해 가공으로 반경 100 μ m 의

4. 가공 특성 비교

4.1 가공 속도

앞에서 언급한 최대 이송 속도를 이용하여 방전, 전해 가공의 최대 재료 제거율을 구하였다. Fig. 7 은 미세 방전 가공과 미세 전해 가공의 최대 재료 제거율 값을 비교한 그래프이다. 각각 10500 μ m³/s, 864 μ m³/s 로 약 12 배 차이를 나타낸다.

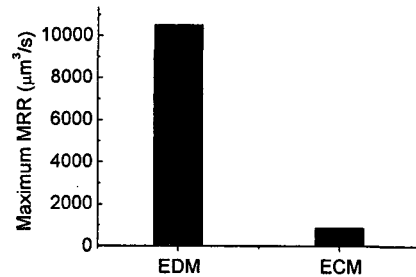


Fig. 7 Maximum MRR

4.2 가공 간극

미세 방전 가공과 미세 전해 가공의 가공 간극을 비교하기 위해 동일한 공구 전극(직경 75 μ m), 절삭 깊이(3 μ m), 공구 경로를 사용하여 미세

사각 기둥을 가공한 뒤 각각의 가공 간극을 측정하였다. 미세 방전 가공은 탈이온수 비저항 0.5 ~ 3.0 MΩ·cm, 직류 40 V, 이송속도 13 μm/s 의 조건에서, 미세 전해 가공은 0.1 M 황산 용액, 진폭 6 V, 주기 1 μs, 펄스 폭 100 ns, 이송 속도 3.7 μm/s 의 조건에서 수행하였다. Fig. 8 에 측정된 가공 간극을 나타내었다. 가공 간극은 두 가공 공정 모두 10 μm 내외로 나왔으며 전해 가공이 방전 가공보다 간극이 약 3~4 μm 작았다.

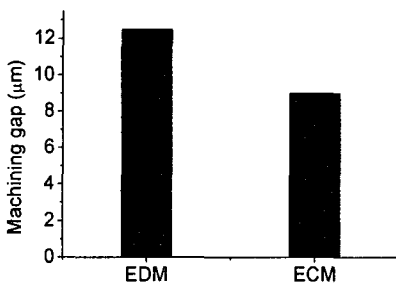


Fig. 8 Machining gap for micro EDM and ECM

4.3 표면 조도

Fig. 9 는 미세 방전 가공과 미세 전해 가공으로 미세 홈을 가공했을 때 가공 표면의 사진이다. 미세 방전 가공은 탈이온수 비저항 0.5 ~ 3.0 MΩ·cm, 직류 40 V, 이송 속도 17 μm/s 의 조건에서 직경 58 μm 원형 전극으로 수행되었고, 미세 전해 가공은 진폭 6 V, 주기 1 μs, 펄스 폭 100 ns, 이송 속도 2 μm/s 의 조건에서 같은 전극으로 수행되었다. Fig. 10 과 같이 표면 조도는 탈이온수를 이용한 미세 방전 가공에서 $R_a = 0.08 \mu\text{m}$, 미세 전해 가공에서 $R_a = 0.028 \mu\text{m}$ 이며 미세 전해 가공에서의 표면 조도가 우수함을 확인할 수 있다.

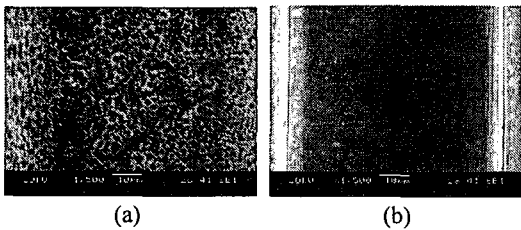


Fig. 9 Surface profiles of grooves machined by (a) micro EDM and (b) micro ECM

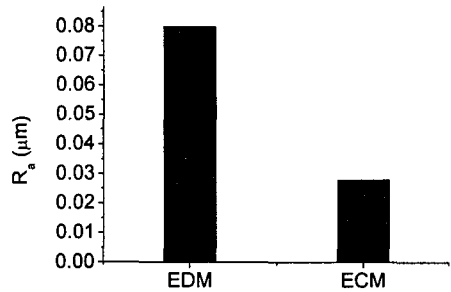


Fig. 10 Surface roughness (R_a)

4.4 공구 마모

Fig. 11 과 Fig. 12 는 반경 100 μm 의 반구 형상 가공 시 발생하는 공구 마모량과 미세 방전 가공 전후의 공구 형상이다. 미세 전해 가공의 경우 공구 마모가 발생하지 않은 것에 반해, 미세 방전 가공은 축 방향으로 약 4 μm 의 공구 마모가 발생하고, 공구 끝의 모서리가 둥글게 변했다. 이것은 형상 정밀도를 떨어뜨리고, 날카로운 모서리 형상을 구현하는데 장애가 된다.

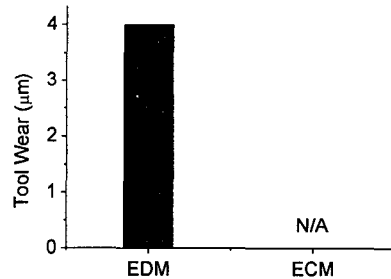


Fig. 11 Tool wear

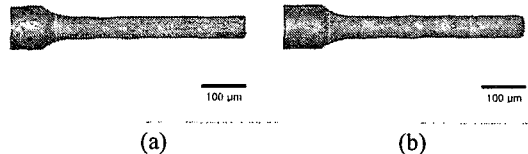


Fig. 12 Tool electrode for micro EDM (a) before machining (b) after machining

이와 같이 미세 방전 가공과 미세 전해 가공은 가공 특성에 있어서 몇 가지 차이를 보인다. 탈이온수를 절연액으로 사용하는 미세 방전 가공은 상대적으로 가공 속도가 빠르지만 가공 간극이

크고, 공구 마모가 발생하여 형상 정밀도를 확보하기가 쉽지 않다. 한편, 미세 전해 가공은 가공 간극을 줄일 수 있고 공구 마모가 없으며 표면 조도가 매우 우수한 반면, 가공 속도가 느려 복잡한 3차원 형상 가공에는 상당한 가공 시간이 소요된다.

5. 방전/전해 복합 가공

5.1 가공 원리

미세 방전 가공과 미세 전해 가공의 유리한 가공 특성만을 이용하기 위해 방전/전해 복합 공정을 미세 형상 가공에 적용할 수 있다. 즉 단일 공정으로 3차원 미세 형상을 제작할 때 발생하는 문제점을 상대 공정의 장점으로 보완하기 위해서, Fig. 13에서 나타내고 있는 것처럼 미세 방전 가공으로 황삭을, 미세 전해 가공으로 정삭을 수행하는 것이다. 비교적 높은 재료 제거율을 갖는 미세 방전 가공은 황삭에 유리하고, 작은 가공 간극, 우수한 표면 조도와 함께 공구 마모가 없는 미세 전해 가공은 정삭에 유리한 특성을 나타내기 때문이다. 이러한 복합 공정은 절연액과 전해액으로 각각 탈이온수와 묽은 황산을 사용하기 때문에 가능하다. 두 용액 모두 수성이므로 같은 가공 수조에서 차례대로 사용할 수 있다. 따라서 같은 기계에서 순차적으로 두가지 가공 공정을 수행함으로써, 공구 전극이나 공작물의 장착 오차가 발생하지 않고 공정 전환도 신속히 할 수 있다. 이와 같이 방전/전해 복합 가공을 통해 우수한 형상 정밀도와 표면 조도를 가진 미세 형상을 보다 신속히 제작하는 것을 기대할 수 있다.

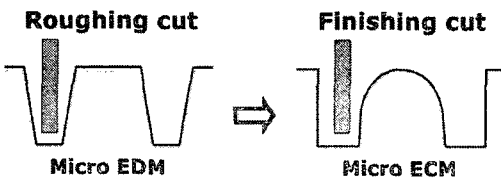


Fig. 13 Schematic diagram of hybrid process

5.2.3 3차원 미세 형상 가공

방전/전해 복합 가공을 이용하여 반경 100 μm 의 반구 형상을 가공하였다. 반구 형상을 가공하기 위해서 미세 방전 가공으로 황삭, 미세 전해 가공으로 정삭을 수행하였다. Table 2에 가공 조건을 나타내었다.

Table 2 Machining condition for the micro hemisphere fabrication

Electrode	WC, Diameter 58 μm
Workpiece	STS 304
Micro EDM	
Dielectric Fluid	Deionized Water 0.5 ~ 3.0 $\text{M}\Omega\text{-cm}$
Discharge Circuit	DC 40 V, 400 pF
Feed Rate	19 $\mu\text{m/s}$
Depth of Cut	5 μm
Machining Time	40.86 min
Micro ECM	
Electrolyte	0.1 M H_2SO_4
Pulse	Amp. 6 V Period 1 μs , Width 100 ns
Feed Rate	2 ~ 6 $\mu\text{m/s}$
Depth of Cut	3 μm
Machining Time	108.90 min

미세 방전 가공 시에는 19 $\mu\text{m/s}$ 이송 속도로 방전 가공을 실시하였다. 이 때 이송 속도는 전극과 공작물의 접촉이 거의 발생하지 않고 안정적인 가공 상태를 유지하도록 설정하였다. 또한 정삭을 위해 최종 형상에 20 μm 의 여유 간격을 남기도록 공구 경로를 선정하였다. 미세 방전 가공이 끝나면 탈이온수에서 0.1 M 황산 전해액으로 교체하고 미세 전해 가공을 수행하였다. 2 ~ 6 $\mu\text{m/s}$ 의 가변 이송 속도의 조건에서 정삭을 실시하였다. 가변 이송 속도 방법은 가공 상태가 양호할 때 이송 속도를 서서히 증가시키고 단락이 발생하면 속도를 낮추는 방법으로 가공 속도를 높이기 위한 방법이다. Fig. 14은 방전/전해 복합 가공을 이용하여 반경 100 μm 의 미세 반구 형상을 가공한 예이다. 테두리 부분에 홈집(pit)이 보이는 부분이 방전 가공한 면이며 내부의 반구형 부분이 방전 가공 후 전해 가공으로 정삭을 한 곳이다.

Fig. 15에서 앞의 실험 결과를 토대로 방전 가공, 전해 가공, 복합 가공으로 반경 100 μm 의 반구를 가공하였을 때 각각의 실제 가공 시간, 전극 마모량, 표면 조도를 비교하였다. 복합 가공의 경우 가공 시간은 150 분으로 427 분이 소요된 미세 전해 가공에 비해 65 % 단축되었다. 즉, 복합 가

공을 사용함으로써 전해 가공만을 수행했을 때보다 가공 시간을 단축하고, 방전 가공에서 문제시 되는 전극 마모로 인한 형상 오차와 표면 조도를 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

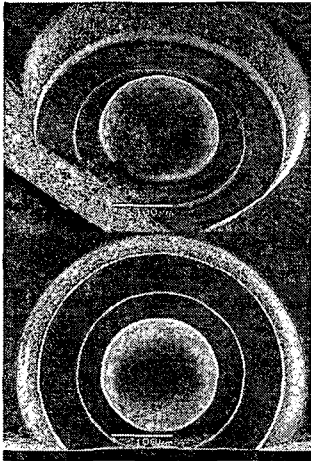


Fig. 14 Micro hemisphere machined by EDM/ECM hybrid process (STS 304, 100 μm radius hemisphere, \varnothing 58 μm electrode)

6. 결 론

미세 방전 가공은 미세 전해 가공보다 상대적으로 가공 속도가 빠른 반면 공구 전극의 마모가 발생하여 형상 정밀도를 보장하기 어렵다. 한편 미세 전해 가공은 가공 속도가 비교적 느린 대신에 공구 마모가 없어 정밀한 형상 가공이 가능하고 표면 조도 또한 우수하다. 따라서 본 논문에서는 두 공정의 한계점을 서로 보완하기 위해서 탈이온수를 이용한 미세 방전 가공과 묽은 황산을 이용한 미세 전해 가공을 결합하여 방전/전해 복합 가공을 제안하였다. 방전/전해 복합 가공을 활용하여 미세 반구 형상을 제작하였고 가공 속도, 형상 정밀도, 표면 조도 측면에서 각각 개선된 경향을 확인하였다.

참고문헌

- 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.
- 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, 1997.
- Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Etrl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
- Masuzawa, T., Tsukanoto, J. and Fujimoto, M., "Drilling of Deep Microholes by EDM," Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 195-198, 1989.
- 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-4A," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, pp. 107-111, 1999.
- Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Localized Electrochemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses," Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 8, pp. 213-220, 2003.
- McGeough, J. A., "Principles of Electrochemical Machining," Chapman and Hall, London, 1974.
- Kozak, J., Rajurkar, K. P. and Makkar, Y., "Selected

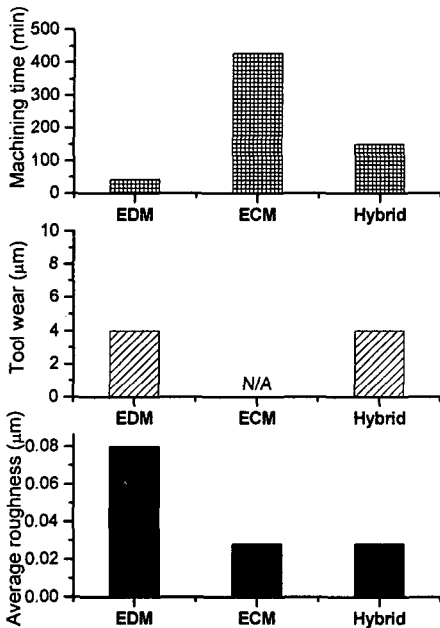


Fig. 15 Comparison of machining time, tool wear and average roughness for for 100 μm radius micro hemisphere

problems of micro-electrochemical machining,”
Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149,
pp. 426-431, 2004.