

방전드릴링 시 발생하는 초경합금의 표면전해부식 방지

ED-drilling of WC-Co to Minimize Electrolytic Corrosion on a Workpiece Surface

송기영¹, 정도관¹, 박민수^{2,✉}, 주종남¹
Ki Young Song¹, Do Kwan Chung¹, Min Soo Park^{2,✉} and Chong Nam Chu¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

² 원광대학교 기계자동차공학부 (Division of Mechanical and Automotive Engineering, Wonkwang Univ.)

✉ Corresponding author: pminsoo@wku.ac.kr, Tel: 02-880-7147

Manuscript received: 2008.12.1 / Revised: 2009.4.1 / Accepted: 2009.5.7

In this study, a simple and effective method was proposed to minimize electrolytic corrosion on the workpiece during ED-drilling using water as a working fluid. The adhesion of a cover plate onto the surface of the workpiece was greatly effective for suppressing electrolytic corrosion during ED-drilling. The experiment revealed that the adhesion of the cover plate prevented corrosion without causing significant changes in machining characteristics. Using the machining method proposed in this paper, electrolytic-corrosion-free holes can be machined without change in the machinery system. By using corrosion-free hole as a start hole for wire EDM, a lead frame die with high quality was fabricated successfully.

Key Words: Electrical Discharge Drilling (방전드릴링), Tungsten Carbide (초경합금), Electrolytic Corrosion (전해부식), Cover Plate (커버플레이트), Electrical Discharge Machining (방전가공)

기호설명

ρ = specific resistance [Ω -cm]

λ = thermal conductivity [W/m-K]

1. 서론

높은 강도와 내마모성을 지닌 초경합금은 산업 현장에서 널리 쓰이는 대표적인 난삭재이다. 이전까지의 금형은 마모와 강도 문제로 인하여 수명에 한계를 가지고 있어서 문제가 생길 때마다 금형의 수정 및 재가공이 필요하였지만 초경합금은 이러한 문제를 개선하여 소모품으로 여겨지던 금형부품들의 수명을 혁신적으로 연장시켰다. 또한 초경합금은 우수한 기계적 특성을 지니고 있어서 현재는 금형 제품뿐만 아니라 각종 절삭공구 및 기계

부품의 주요재료로도 널리 쓰이고 있다. 그러나 재료의 강한 기계적 성질로 인하여 기존의 기계적 절삭가공으로는 복잡하거나 정밀한 가공물을 만들 수 없다.¹ 이에 다이아몬드 디스크를 사용한 연삭가공(Diamond wheel grinding)이나 방전가공(Electrical discharge machining, EDM)등 이 초경합금 가공에 널리 사용되고 있으며, 최근에는 화학적 비접촉식 특수가공방법인 전해가공(Electrochemical machining, ECM)을 통한 초경합금의 가공법도 연구되고 있다.² 그러나 연삭가공으로는 복잡한 형상을 제작하는 것이 불가능하고 초단펄스 전해가공은 가공속도가 느리며 가공이 불안정하다는 단점을 지니고 있다.

방전가공은 가공액 속에서 공구로 쓰이는 전극과 공작물 사이에 방전스파크를 일으켜 이때 발생하는 열에너지를 이용하는 것이다. 공구와 공작물

간에 물리적 접촉 없이 가공하므로 전도성을 띠는 모든 재료를 강도와 경도에 관계없이 다양한 형상으로 정밀가공 할 수 있다.³⁻⁵ 이러한 장점으로 인하여 초경부품의 가공에 방전가공이 널리 적용되고 있다.

소위 슈퍼드릴링(super drilling)이라고 불리는 방전드릴링은 방전가공방법 중 한가지 이다. 전극으로 중공축(hollow electrode)을 사용하며 가공액으로는 물을 주로 사용한다. 전극의 중공을 거쳐 고압의 가공액이 방전간극에 공급되어 비교적 높은 세장비(aspect ratio)의 구멍가공이 가능하기 때문에 터빈블레이드의 냉각로, 인젝션 노즐, 와이어방전가공의 스타트홀(start hole) 가공 등에 널리 쓰이고 있다.

그러나 수돗물과 같이 비저항이 낮은 가공액을 사용하는 방전드릴링은 가공속도가 빠르다는 장점이 있으나 전해부식(electrolytic corrosion)이라는 큰 약점도 가지고 있다. 특히 초경합금의 가공에서는 그 현상이 두드러지게 나타나는데, 이는 초경합금의 주성분 중 하나인 코발트가 전해부식에 매우 취약하기 때문이다. 이 문제는 주로 단방향펄스 전원을 방전전원으로 사용할 때 발생하므로 이를 방지하고자 AC 전원이 사용되기도 한다. AC 전원은 전극과 공작물의 극성을 주기적으로 바꾸어 줌으로써 방전간극의 평균전압을 0V로 만들어 준다. 이를 통해 전기화학적 반응을 억제함으로써 전해부식을 방지한다.⁶ 그러나 AC 전원의 사용은 역방전을 야기하여 전극 마모를 급격히 증가시키므로 주로 전극마모를 고려하지 않아도 되는 와이어방전가공에만 사용된다.^{7,9} 방전드릴링에서 전해부식을 방지하기 위해서 몇몇 기계에서는 가공액으로 물 대신 등유(kerosene)을 사용하기도 하지만 등유의 사용은 전극마모를 증가시키고 가공속도를 느리게 하여 생산성과 비용측면에서 악영향을 끼친다.

방전드릴링은 최근 산업현장에서 널리 쓰이며

그 중요성이 증대되고 있다. 특히 금형산업에서는 와이어방전가공을 위한 스타트홀 가공에 많이 사용되고 있기 때문에 금형 품질에 지대한 영향을 준다.¹⁰ 방전드릴링시 발생한 표면전해부식은 금형의 완성 후에도 그대로 남아있어 금형의 수명 저하뿐만 아니라 생산물의 품질에도 악영향을 주기 때문에 산업 현장에서는 표면전해부식 방지를 위한 방전드릴링 기술의 개발 요구가 끊임없이 제기되어 왔다. 이에 본 논문에서는 방전드릴링시 공작물 표면에 발생하는 전해부식을 방지하고자 실험적 연구를 진행하였다.

2. 초경합금의 방전가공 특성

초경합금은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 텅스텐 카바이드(tungsten carbide, WC)를 코발트(cobalt, Co)가 바인더 역할을 하여 단단히 고정하고 있는 구조이다. 방전가공 시에는 방전스파크가 전도성이 높은 코발트를 통해 흐르는 경향이 있어 이때의 열에 의하여 코발트가 완전히 녹아 제거된다. 이때 텅스텐 카바이드 입자가 같이 떨어져 나오는 경우도 있으며, 방전 스파크의 직접적인 영향으로 텅스텐 카바이드 입자가 녹아 제거되는 경우도 있다. 이처럼 초경합금의 방전가공은 다양한 메커니즘을 통해서 공작물이 제거된다.⁹

방전가공이 진행되는 동안 전극과 공작물 사이에는 강한 전기장이 형성된다. 특히 방전드릴링과 같이 단방향펄스 전원을 사용하는 경우 Fig. 2 와 같이 전기장이 형성된 물 속에서 전극과 공작물 사이에서 전해작용이 일어나게 된다. 초경합금 내의 코발트는 전해에 매우 취약해 가공 중에 물속

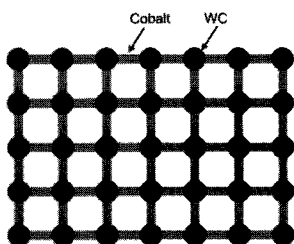
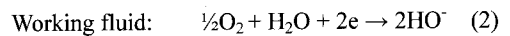
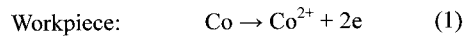


Fig. 1 Construction of WC-Co

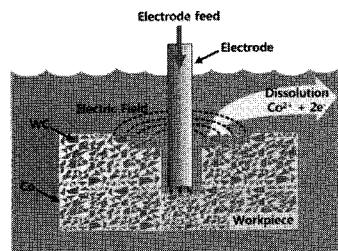


Fig. 2 Electrolyzation during EDM process

으로 전해용출 되어 그 결과 원하지 않는 표면 전해부식이 발생하게 된다. 식 (1)과 (2)는 가공 중 발생하는 전해현상을 나타낸다.¹¹⁻¹³

3. 실험장치

방전드릴링은 Fig. 3 과 같이 중공축 전극과 물을 사용하여 공작물에 구멍을 가공한다. 전극은 콜릿척(collet chuck)에 고정되어 회전하며 전극가이드(electrode guide)는 회전으로 인한 전극의 진동을 방지하여준다. 가공액인 물은 콜릿척과 전극을 거쳐 가공액으로 공급된다. 높은 압력으로 공급되는 가공액과 전극 회전에 의하여 가공 시 발생하는 가공부스러기(debris)는 원활하게 배출된다. 이에 가공액의 방전환경도 용이하게 조성되어 비교적 깊은 구멍을 공작물의 강도와 경도에 관계 없이 가공할 수 있다.

Fig. 4 는 본 연구에서 사용된 방전드릴링기의 사진이다. 본 장비는 RC-Transistor 형식의 방전회로를 가지고 있으며 Fig. 5 는 그 개략도를 나타낸다. 단방향펄스 전원을 사용하여 가공을 위한 전기에너지를 공급하며 전극과 공작물 사이에 설치된 콘덴서의 충전과 방전을 통하여 가공이 진행된다. 이때 트랜지스터의 지속적인 스위칭 작용으로 아크방전을 방지한다.

가공 실험에는 외경 1mm 의 황동과 구리전극을 각각 사용하였으며 가공액으로는 수돗물과 탈이온수를 사용하였다. 공작물은 두께 10mm 코발트 합량 8% 의 초경합금이다. 가공전원은 90V, 30A 의 단방향펄스 전원이 쓰였으며 220×10^3 pF 용량의 콘덴서가 사용되었다. 가공조건은 Table 1 과 같으며, 그 결과로 가공 중에는 Fig. 6 과 같은 방전파형이 생성된다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 전극재질의 영향

방전드릴링의 전극 재료로는 주로 황동과 구리가 사용된다. 황동은 구리에 비하여 강성이 좋고 구리는 전기 및 열 전도도가 높다. 본 실험에서는 동일 가공조건에서 각각의 전극재료가 가공특성과 전해부식 발생에 미치는 영향을 살펴보았다. 가공액으로는 수돗물을 사용하였고 전극 재질을 제외한 모든 가공 조건은 Table 1 과 동일하게 유지하였다.

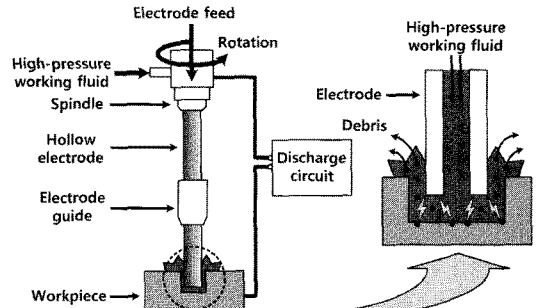


Fig. 3 Schematic of ED-drilling

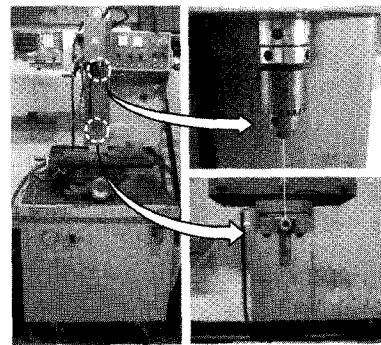


Fig. 4 ED-drilling machine used

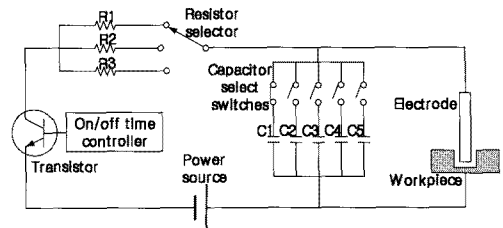


Fig. 5 RC-transistor discharge circuit

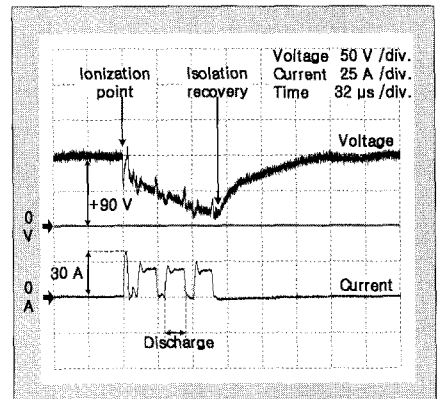


Fig. 6 The waveform of discharge during machining

Table 1 Machining conditions

Electrode		
Material	Brass	65 wt.%Cu / 35 wt.%Zn $\lambda = 119 \text{ W/m}\cdot\text{K}, \rho = 6.79 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$
	Copper	$\lambda = 401 \text{ W/m}\cdot\text{K}, \rho = 1.50 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$
Size	Inner	$\phi 0.3 \text{ mm}$
	Outer	$\phi 1 \text{ mm}$
Rotation speed	300 RPM	
Workpiece		
Material	WC-Co	(8 wt.%Co)
Thickness	10 mm	
Working fluid		
Water	Tap water	($\rho < 1 \times 10^4 \Omega\cdot\text{cm}$)
	Deionized water	($\rho = 2.50 \times 10^6 \Omega\cdot\text{cm}$)
Pressure	500 psi	
Electrical conditions		
Open gap voltage	90 V	
Peak current	30 A	
Capacitance	$220 \times 10^3 \text{ pF}$	
On time / Off time	$15 \mu\text{s} / 10 \mu\text{s}$	

실험결과 황동전극을 사용하였을 때는 Fig. 7(a)와 같이 가공된 구멍의 반경방향으로 약 2mm 의

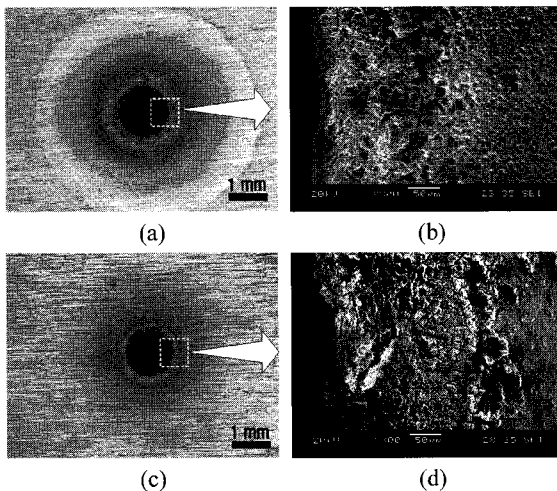


Fig. 7 EDMed holes according to electrode materials; (a) A brass electrode used, (b) The magnified SEM image of part (a), (c) A copper electrode used, and (d) The magnified SEM image of part (c)

변색된 전해부식 영역이 관찰되었고 특히 전해부식에 의해 가공된 구멍 근처에는 Fig. 7(b)와 같이 심각한 표면 손상이 관찰되었다. 구리전극을 사용하였을 때는 Fig. 7(c)에서 보인 바와 같이 황동전극의 경우보다 작은 전해부식영역이 발생하였다. 뚜렷한 전해부식 영역의 경계가 드러나지 않았으나 구멍의 반경방향으로 약 1mm 의 영역에 걸쳐 발생하였다. 또한 가공된 구멍에 근접한 부분은 Fig. 7(d)와 같은 심각한 표면 손상이 발생하였다. 각 전극에 따른 가공 특성은 Table 2 와 같다. 전기 및 열 전도도가 우수한 구리전극의 사용이 황동전극의 사용보다 가공속도가 빠르고 전극마모가 적었다. 또한 가공속도가 빠른 구리전극을 사용한 경우 공작물 표면에서 전해현상이 일어나는 시간이 줄어들어 전해부식영역이 상대적으로 작았다. 이를 확인하기 위해서 구리전극으로 구멍을 가공

Table 2 Machining results according to electrodes

Electrode	Brass	Copper
Machining time	251 sec	99 sec
Electrode wear length	134 mm	1 mm

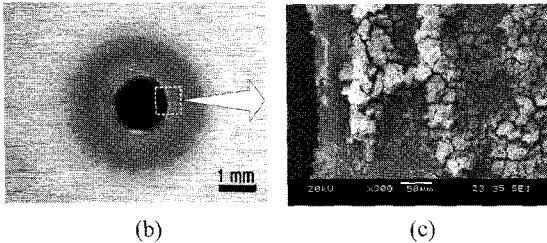
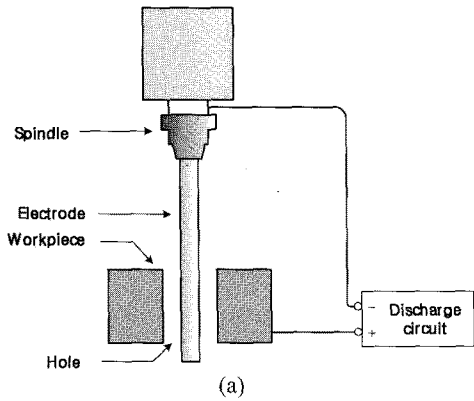


Fig. 8 Supplying machining voltage after drilling a hole; (a) Supplying voltage, (b) 150 sec after drilling, and (c) The magnified SEM image of part (b)

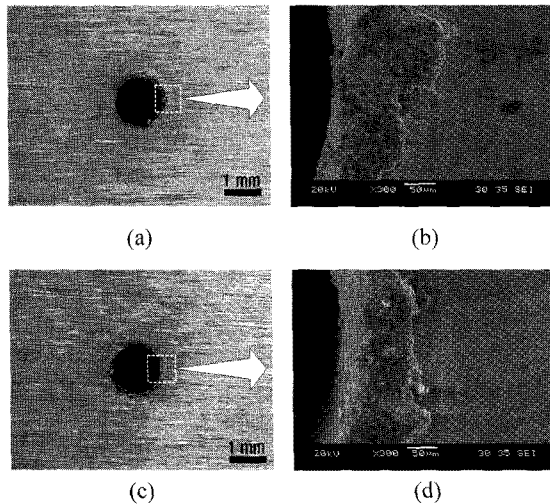


Fig. 9 EDMed holes using deionized water; (a) A brass electrode used, (b) The magnified SEM image, (c) A copper electrode used, and (d) The magnified SEM image

한 후 Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 가공전원을 계속 인가하였다. 구멍 가공 시간과 전원 인가시간의

합이 황동전극을 사용하여 구멍을 가공한 시간인 251sec 와 동일하게 하였다. 그 결과 Fig. 8(b)에서 처럼 전해부식 영역이 확장되었으며 가공된 구멍 근처 또한 Fig. 8(c)와 같이 심각한 표면 손상이 발생하였다.

4.2 가공액 비저항의 영향

방전드릴링의 가공액으로는 주로 물이 사용된다. 전기화학적 반응에 영향을 미치는 물의 비저항에 따른 가공특성을 알아보기 위해, 일반적으로 쓰이는 수돗물을 탈이온수와 비교하여 가공을 진행하였다. 수돗물은 각종 첨가제와 대기 중의 기체가 전기화학적 반응이 가능한 이온의 형태로 녹아있어서 비저항이 낮지만, 탈이온수는 이러한 이온들이 상당수 제거된 순수(純水)에 가까운 물이므로 비저항이 높다. 전극은 황동과 구리를 각각 사용하였고, 가공액을 제외한 모든 가공 조건은 Table 1 과 동일하게 유지하였다. Fig. 9 은 가공된 구멍을 나타낸다. 수돗물을 가공액으로 사용한 Fig. 7 과 비교해보면, 탈이온수의 사용은 Fig. 9(a), (c) 에 보인 바와 같이 전해부식영역을 급격하게 감소시켰다. 이는 탈이온수는 수돗물에 비하여 비저항이 높고 함유된 이온의 양이 적어 전해부식이 일어나기 어려운 조건을 가지고 있기 때문이다. 그러나 Table 3 에서 보는 바와 같이 가공시간과 전극 소모는 탈이온수를 사용하였을 때 급증하였는데, 이는 가공 간극에서 발생하는 유효방전횟수가 줄어들고 전해에 의한 가공이 억제되었기 때문이다.¹⁴⁻¹⁶ 또한 Fig. 9(b), (d)와 같이 가공된 구멍 주위로 공작물이 재용고 되어 융착된 버(burr)를 발견할 수 있었다. 이는 수돗물의 경우 가공 중 전해용출에 의해 버가 모두 제거되지만, 탈이온수는 이러한 전해용출이 억제되기 때문에 버가 남아있는 것이다.

Table 3 Machining results using deionized water

Electrode	Brass	Copper
Machining time	312 sec	207 sec
Electrode wear length	175 mm	53 mm

4.3 커버플레이트의 부착

초경합금의 방전드릴링 중에 발생하는 전해부식은 공작물 표면의 코발트가 가공액인 물 속으로 전해용출되기 때문에 발생한다. 이러한 문제를 방지하기 위하여 Fig. 10 과 같이 공작물 표면에 커버

Table 4 Material characteristic

Cover plate	
Material	304SS $\lambda = 401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ $\rho = 1.50 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$
Thickness	0.1 mm

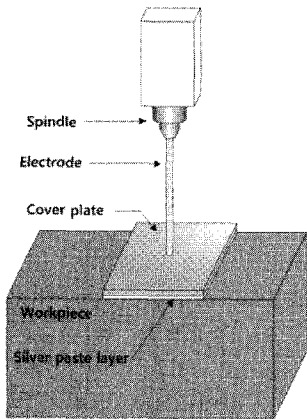


Fig. 10 The workpiece covered by cover plate

플레이트(cover plate)를 부착한 후 가공을 수행하였다. 커버플레이트는 Table 4 에 보인 바와 같이 0.1 mm 두께의 스테인리스 스틸(stainless steel)을 사용하였으며 실버페이스트를 이용하여 공작물 표면에 부착하였다. 스테인리스 스틸은 얇은 두께에서도 변형이 거의 없으며 실버페이스트는 전기전도성이 좋고 방전가공 중에 물에 녹지 않으면서 가공 후에는 아세톤과 같은 유기용제로 쉽게 제거가 가능하다. 가공조건은 Table 1 의 일반적인 가공조건과 같고 가공액 또한 일반적으로 사용되는 수돗물을 사용하였다. 커버플레이트 부착 실험 결과 Fig. 11 과 같이 가공 후에도 구멍 주위에 전해부식 영역이 발생하지 않았다. 이는 커버플레이트가 공작물 표면과 가공액의 직접 접촉을 막아주어 공작물 표면의 코발트가 전해용출되지 않았기 때문이다. 또한 커버플레이트의 부착은 공작물 표면에 발생하는 버도 방지하였다. 가공시작 시 발생하는 버가 Fig. 12 에 보인 바와 같이 공작물 대신 커버플레이트 표면에서 관찰되었다.

Table 5 는 가공시간과 전극마모를 나타낸다. 커버플레이트의 두께가 얇기 때문에 가공시간이나 전극마모와 같은 가공특성에는 거의 영향이 없었다. 즉 기존 가공 결과인 Table 2 와 비교하여 가공

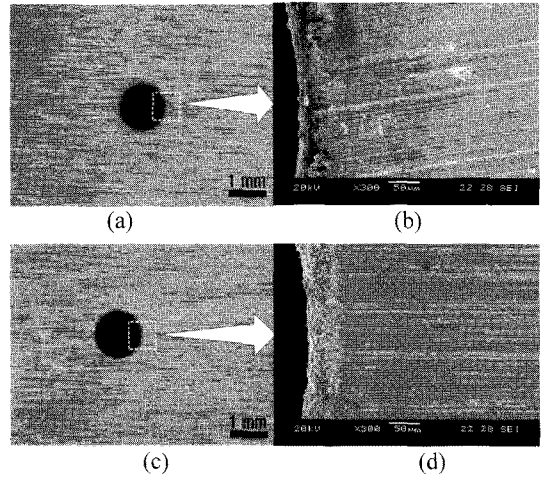


Fig. 11 EDMed holes using cover plates; (a) A brass electrode used, (b) Magnified SEM image of part (a), (c) A copper electrode used, and (d) Magnified SEM image of part (c)

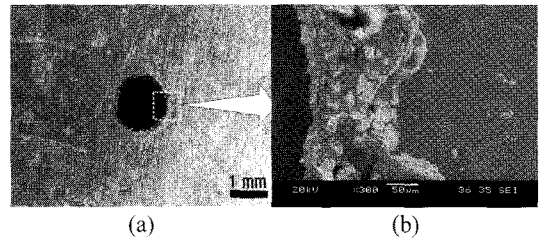


Fig. 12 The cover plate; (a) The hole on the cover plate, and (b) Magnified SEM image of part (a)

Table 5 Machining results using deionized water

Electrode	Brass	Copper
Machining time	248 sec	92 sec
Electrode wear length	134 mm	2 mm

특성의 저하 없이 가공부 주변에 생기던 전해부식 영역이 방지되었다.

4.4 금형 가공 기술에 적용

초경합금 공작물은 그 우수한 기계적 성질로 인하여 금형의 주요 재료로 널리 쓰인다. 특히 프레스 금형의 경우는 방전드릴링과 와이어방전가공을 이용하여 주로 제작되며 Fig. 13 은 그 작업 공정의 개략도를 나타낸다. 리드프레임 금형과 같은 다이(die) 형상 제작 시에는 일반적으로 방전드릴링으로 공작물에 스타트홀을 가공한 후 와이어방

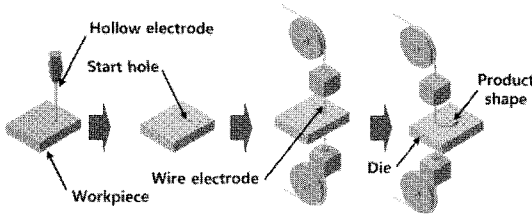
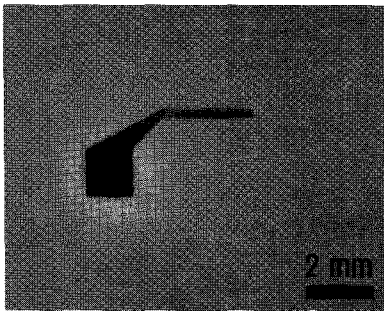
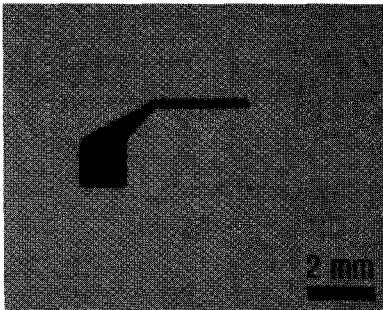


Fig. 13 Die-making process by EDM



(a)



(b)

Fig. 14 The frame dies; (a) with electrolytic corrosion, and (b) without electrolytic corrosion

전가공으로 프레임 형상을 가공한다. 와이어방전가공의 경우 AC 전원의 사용으로 가공 중 공작물에 전해부식이 발생하지 않기 때문에 스타트홀의 품질이 금형의 품질에 지대한 영향을 미친다. Fig. 14는 스타트홀 가공 후 고주파 AC 방전전원을 이용한 와이어컷 방전가공기로 초경합금에 프레임 금형을 가공한 예이다. Fig. 14(a)의 경우 스타트홀가공 시 발생한 전해부식영역이 금형 형상의 완성 후에도 금형 표면에 그대로 남아 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 전해부식은 금형의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 금형으로 생산된 제품의 품질에도 악영향을 미친다. 반면 커버플레이트 부착으로

전해부식을 방지한 스타트홀을 이용한 경우, Fig. 14(b)와 같이 표면 손상이 없는 금형을 제작할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 방전드릴링 시 발생하는 전해부식을 방지하기 위한 실험을 진행하였다. 우선 흔히 사용되는 전극재질인 황동과 구리에 대한 비교 실험을 수행하였다. 그 결과 구리를 사용한 경우, 전극마모와 가공시간이 줄어드는 실험결과를 확인할 수 있었다. 전해부식을 제거하기 위해 가공액으로 비저항이 높은 탈이온수를 사용한 경우에는 전해부식영역을 급격히 감소시킬 수 있었으나 가공시간과 전극마모가 늘어나는 단점이 있었다. 이에 가공시간이나 전극마모의 증가와 같은 가공특성 저하 없이 공작물 표면에서의 전해부식을 효과적으로 방지하기 위하여 커버플레이트를 부착하였다. 그 결과 전해 부식 방지뿐만 아니라 입구부의 비도 제거가 가능했다. 이렇게 제작된 스타트홀을 와이어방전가공에 사용하여 표면손상이 없는 프레임 금형을 제작 할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 커버플레이트 부착 방법은 기존 방전드릴링기의 시스템 변경 없이 그대로 적용이 가능할 뿐만 아니라 가공특성에 악영향을 미치지 않아 일선 현장에 바로 적용이 가능하다고 사료된다.

참고문헌

1. Jahan, M. P., Wong, Y. S. and Rahman, M., "A comparative study of transistor and RC pulse generators for Micro-EDM of tungsten carbide," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 9, No. 4, pp. 3-10, 2008.
2. Choi, S. H., Kim, B. H. and Chu, C. N., "Micro electrochemical machining of tungsten carbide," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 12, pp. 111-116, 2006.
3. Tasi, C. H., Yan, B. H. and Huang, F. Y., "EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 3, pp. 245-252, 2003.
4. Puertas, I., Luis, C. J. and Álvarez, L., "Analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, MRR and EW of WC-Co," Journal of Materials

- Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 1026-1032, 2004.
5. Lee, S. H. and Li, X., "Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, No. 1-3, pp. 315-321, 2003.
 6. Obara, H., Satou, H. and Hatano, M., "Fundamental study on corrosion of cemented carbide during wire EDM," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 1-3, pp. 370-375, 2004.
 7. Ho, K. H., Newman, S. T., Rahimifard, S. and Allen, R. D., "State of art in wire electrical discharge machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 12-13, pp. 1247-1259, 2004.
 8. Song, K. Y., Chung, D. K., Park, M. S. and Chu, C. N., "Micro electrical discharge drilling of tungsten carbide using deionized water," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, Issue 4, Paper No. 045006, 2009.
 9. Guitrau, E. P., "The EDM handbook," Hanser Gardner Publications, pp. 184-193, 1997.
 10. Nakata, S., Namotake, M., Tamio, T., Masanori, F., "Electrical discharge machining technology," *Nikkan Kogyo Shimbun, Ltd.*, pp. 180-182, 1997.
 11. Tăbăcaru, V., Banu, M. and Bouvier, S., "Machinability analysis by wire cut electroerosion of special hard metals," *The Annals of Dunarea de Jos Universtity Galati.*, pp. 66-69, 2006.
 12. Manabe, A. and Haishi, Y., "Wire electrical discharge machining," *Nikkan Kogyo Shimbun, Ltd.*, pp. 179-181, 2003.
 13. Kim, C. H. and Kruth, J. P., "Machinability and surface characteristics of sintered carbides in W-EDM," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 100-105, 1999.
 14. Seo, D. W., Park, M. S., Yi, S. M. and Chu, C. N., "Machining characteristics of micro-EDMed holes according to dielectric fluid, capacitance and ultrasonic vibrations," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 12, pp. 42-49, 2007.
 15. Kim, C. H. and Kruth, J. P., "Influence of the electrical conductivity of dielectric on WEDM of sintered carbide," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 12, pp. 1676-1682, 2001.
 16. Yamazaki, M. and Suzuki, T., "Electrical discharge machining," *Nikkan Kogyo Shimbun, Ltd.*, pp. 40-41, 2007.