



2018년 8월 석사학위논문

3D Printer 기반 전극 공구 제작을 통한 전기화학가공에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원 기계시스템·미래자동차공학과 김 기 권



3D Printer 기반 전극 공구 제작을 통한 전기화학가공에 관한 연구

A Study of the Electrochemical Machining of Electrode Tools Based on 3D Printing

2018년 8월 24일

조 선 대 학 교 대 학 원 기계시스템·미래자동차공학과

김 기 권





3D Printer 기반 전극 공구 제작을 통한 전기화학가공에 관한 연구

지도교수 박 정 우

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2018년 4월

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

김 기 권





김기권의 석사학위 논문을 인준함.



2018년 5월

조선대학교 대학원



목 차

LIST OF TABI	LES	Ι
LIST OF FIGU	RES	Π
LIST OF PHOT	rographs	IV
ABSTRACT		V
ᅰᅬ᠈〉 큰		
세1상 서 논		• 1
1-1 연구배경	••••••	• 1

1-2 연구목적 및 내용 4

제2장 실험장치 설계 및 실험방법 ………………………… 6

- - - 3-3 전도성 코팅별 전극 공구를 이용한 전기화학가공 ……24



제4장 구리 전극 공구와 3D Printing을 통한 제작된
전극 공구 비교
4-1 구리 전극 공구의 전기화학가공
4-2 3D Printing 전극 공구의 전기화학가공
4-3 전극 공구의 가공 비교에 따른 분석30
제5장 자유 형상 전극 공구 제작
5-1 파형형상 및 다단형상 가공실험33
5-2 전극 공구 교환을 통한 가공실험
제6장 결론 40

참 고 문 헌





LIST OF TABLES

Table.1	Experimental conditions12
Table.2	Relationship between depth and diameter with current density by
	using original electrode tool
Table.3	Relationship between depth and diameter with current density by
	using silver paste coated electrode tool
Table.4	Experimental conditions of waved electrode tool ECM
Table.5	Result of ECM using replacement electrode tool with silver paste
	coated





LIST OF FIGURES

Fig.1 Classification of additive manufacturing processes
Fig.2 Process of fabricating electrode tool for ECM
Fig.3 Principal of ECM
Fig.4 Graph of pulse waveform
Fig.5 Schematic diagram of FDM 3D printer
Fig.6 Schematic diagram of ECM 11
Fig.7 Processes of fabricating conductive coating electrode tool $\cdots\cdots\cdots 14$
Fig.8 Conductive coating layers of electrode tool
Fig.9 Processes of preparing substrate for sheet resistance and thickness
measurement (a)spraying (b)painting17
Fig.10 Relationship between sheet resistance and thickness of SCC for
number of spray
Fig.11 SEM image of surface conductive coated with SCC (a) $500\times$
(b) 3000×
Fig.12 Analysis of SCC using SEM-EDS
Fig.13 Relationship between sheet resistance and thickness of Ni-coating
for number of spray
Fig.14 SEM image of surface conductive coated with Ni-coating (a)500 \times
(b) 3000×
Fig.15 Analysis of SCC using SEM-EDS
Fig.16 Relationship between sheet resistance and thickness of silver paste
for number of painting 22
Fig.17 SEM image of surface conductive coated with silver paste (a)500 \times
(b) 3000×
Fig.18 Analysis of silver paste using SEM-EDS
Fig.19 ECM using SCC coated electrode tool (a) electrode tool before ECM $% \left({{{\rm{ECM}}} \right)$
(b) electrode tool after ECM (c) machined sample





Fig.20	ECM using Ni-coated electrode tool (a)electrode tool before ECM
	(b) electrode tool after ECM (c) machined sample
Fig.21	ECM using silver paste coated electrode tool (a)electrode tool
	before ECM (b)electrode tool after ECM (c)machined sample \cdots 25
Fig.22	Original electrode tool for ECM
Fig.23	Depth of ECM using copper electrode tool by current density \cdots 27
Fig.24	Diameter of ECM using copper electrode tool by current density 27
Fig.25	Depth of ECM using silver paste coated electrode tool by current
	density
Fig.26	Diameter of ECM using silver paste coated electrode tool by
	current density
Fig.27	Diameter of machined area by current density (a) used original
	electrode tool (b) fabricated electrode tool
Fig.28	Comparison of depth machined using copper electrode tool and
	silver paste coated electrode tool at current density 4.9A/cm 2 $\cdots 32$
Fig.29	Comparison of depth machined using copper electrode tool and
	sliver paste coated electrode tool at current density of $16.8 \text{A/cm}^2 32$
Fig.30	Design of waved electrode tool
Fig.31	Waved electrode tool after wave electrode tool ECM $\hfill \hfill \hfil$
Fig.32	Design of stepped electrode tool
Fig.33	Machined STS304 after ECP and cross-section view of a-a' \cdots 36
Fig.34	Profile of depth machined using stepped electrode tool
Fig.35	Process of replacement electrode tool fabrication
Fig.36	Replacement electrode tool coated with silver paste
Fig.37	Depth of ECM for electrode tool changer by current density 39





LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo.1	Equipment	of	ECM	stage		11	1
---------	-----------	----	-----	-------	--	----	---





ABSTRACT

A Study on the Electrochemical Machining of Electrode Tools Based on 3D Printer

Kim, Ki-Gwon

Advisor : Prof. Park, Jeong-Woo, Ph. D. Department of Mechanical System and Automotive Engineering Graduate School of Chosun University

In this study, we fabricated electrode tools for electrochemical machining (ECM) using three-dimensional (3D) printing, which outputs free shapes rapidly. Electrochemical processing involved the application of a conductive coating to a fuse deposition modeling (FDM)-type plastic material; this process is relatively cheap compared with 3D printing of metals. Silver paste, a heat-resistant material, was applied as the conductive coating for ECM. Machining analysis was performed over a range of current densities using an actuator capable of precise transfer to a small stage for ECM and improved machining accuracy. Our results showed that this approach produced electrode tools capable of precise ECM. Given the ability of 3D printing to produce electrode tools with complex shapes, our approach shows great potential for future ECM applications involving multi-stage and/or wave shapes.





제1장서론

1-1 연구배경

전기화학가공(Electrochemical machining, ECM)은 비접촉식 특수가공으로 가공하기 어려운 난삭재를 가공하는데 적합한 기술로 공작물이 전극 공구의 형상 에 맞게 가공이 된다.

ECM은 1929년에 처음 소개되었으며¹⁾ 1950년대에서부터 항공기 및 우주산업 에서의 대형 부품의 성형, 마무리, 디버링 등 여러 작업을 위한 주요 기술로 발전 해왔다.^{2,3)} 이러한 전기화학가공은 복잡하고 모양이 큰 금속을 가공부터, 직경이 수 마이크로미터인 실리콘 등 다양한 부품을 제조하는데 중요한 역할을 한다.

ECM의 장점은 공구 마모가 없으며, 재료제거율이 높다는 점이다.⁴⁾ 하지만 ECM은 가공 시 전해액 온도의 상승으로 인하여 버블이 발생되어 공작물에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다는 단점이 있다.⁵⁾ 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 공작물 내부를 통해 전해액을 주입하여 지속적인 순환이 이루어지는 방법과 전극 공구에 초음파를 발생시켜 버블을 제거하는 방법이 있으며, ECM을 할 때 직류 대 신 Pulse를 인가시키는 방법, 전기화학적 해석을을 통한 결과 예측을 이용하는 방 법 등이 있다.⁶⁻¹¹⁾ 하지만 전해액을 전극 공구의 내부에서 주입하게 되면 표면상에 돌출부를 발생시키게 된다. 이를 해결하기 위해 밀링이나 전극 공구를 회전을 시켜 돌출부를 제거하는 방법과,¹²⁾ Tomohiro의 경우 돌출부가 생성되는 문제를 해결하 기 위해 Porous 전극 공구를 제작하여 돌출부를 제거하였다.¹³⁾ 이와 같이 ECM에 서 가공정밀도를 높이기 위한 여러 방법 등이 연구 되고 있으며, 전극 공구의 제작 은 ECM에서 중요한 역할을 한다. 하지만 단순한 전극 공구의 형상과 달리 복잡한 형상의 전극 공구를 제작하기 위해선 많은 공정을 통해 제작이 되며, 전극 공구의 크기에 따라 많은 절삭공구가 필요하다. 또한 이러한 공정들이 반복되면 공구 정밀 도가 떨어져 전극 공구의 제작이 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제는 ECM을 위 한 전극 공구의 제작과정에서 많은 비용과 공정을 초래한다. 따라서 복잡한 전극 공구의 형상을 쉽고 빠르게 상대적으로 저렴한 비용으로 제작하기 위하여 3D Printing을 이용하고자 한다.

Additive manufacturing (AM)은 재료가 층층이 쌓여 3D 형상을 만드는 기술이 다. AM은 Rapid prototyping, Direct digital manufacturing, 3D Printing 등 많 은 기술들을 포함한다. 그 중 3D Printing은 제품을 생산하기 전 실제 제품 크기 의 시제품을 제작하는데 주로 사용되어 왔으며, 기술의 발전으로 공학, 재료과학, 국방, 의료 등 많은 분야에서 활용되고 있다.¹⁴⁾ 많은 분야에서 사용되는 3D Printer는 다양한 방법을 통해 형상을 제작한다. Fig.1은 Additive manufacturing 의 분류를 나타내며, Stereolithography (SLA), Fused deposition modeling (FDM), Selective laser sintering (SLS), Laser metal deposition (LMD) 등을 보여준다.¹⁵⁾

먼저, SLA는 액체 상태의 폴리머 합성수지를 뿌려 얇은 막을 생성하면서 입체적 인 물체를 만드는 방법으로, 얇은 막이 한 층씩 만들어 질 때마다 물체를 조금씩 내리면서 쌓아가는 방식이다. SLA 장점은 원형에 가까운 형상을 만들 수 있지만, 시간이 지날수록 내구성이 낮아지고, 마모가 된다는 단점이 있다.

FDM 방식은 가열된 Extruder에 필라멘트가 드라이브 휠에 의해 주입되면서, 녹은 필라멘트가 층층이 쌓이는 방식이다. 내구성이나 강도에서 SLA보다 좋지만, 표면이 거칠다는 단점을 가지고 있다.

SLS 방식은 분말형태의 원료를 원하는 부분만 레이저로 소결시켜 층층이 쌓아 가는 방식으로 높은 강도와 강성을 가지지만, 고출력 레이저를 사용하기 때문에 고가이며, 프린팅된 제품의 표면은 다공성을 가지고 있다는 것이 단점이다. 현재 대부분의 금속 3D Printing은 대부분 SLS방식이며, 금속 3D Printing을 통해 다 양한 형태의 금속 제품을 생산하고 있다.

이러한 3D Printing을 많은 분야에서 사용하며, 3D Printing에서 사용하는 재료 의 개발을 통해 실제 사용 가능한 공구나 몰드를 제작하는데 사용되고 있다. 금속 3D Printing의 개발은 가공하기 쉽지 않은 난삭재를 가공하고자 하는 기술인 ECM의 전극 공구를 개발하는데 사용 될 수 있으며, 자유로운 형상을 출력할 수 있다는 점에서 형상에 따른 전극 공구의 제작이 가능하다. 금속 3D Printing의 대 부분은 레이저 소결에 의해 제품이 제작되지만 많은 시간과 비용이 소모된다.¹⁶⁾

- 2 -



이러한 금속 3D Printing을 이용하는 방법 외에 공구 제작방법에 대한 연구가 진행 중이다.¹⁰⁾ 먼저 Silicon(Si)을 이용하여 제작하는 전극 공구는 ECM에서의 부식성에 강하며, 높은 정확도와 품질이 보장된다. 하지만 Si를 이용한 전극 공구 는 제작과정에서 많은 비용을 요구한다. 또한 Lyubimov 연구에서는 prototyping 기술로 전극 공구를 제작하며, 전극 공구에 Galvanic deposition 및 진공 증착을 통해 전기전도성을 부여하여 실제 가공에 사용하고자 하였으나 전기화학 가공 시 열에 의하여 구리 박막의 결함이 발생하였다.¹⁷⁾ 이러한 문제들은 과도한 전류의 인가로 전도성층이 열을 견디지 못한 것으로 전극 공구의 손상이 되었다. 이와 같 은 하지만 ECM은 난삭재와 복잡한 형상을 가공하기에는 가장 적합한 가공이며, 가공정밀도 향상을 통해 제품을 생산하는데 적합하다. 따라서 이러한 가공정밀도 향상을 위해 전극 공구 제작에 관한 연구가 지속되어야한다.



Fig.1 Classification of additive manufacturing processes





1-2 연구목적 및 내용

ECM은 공작물과 전극 공구의 전기화학반응을 이용하기 때문에 가공에 사용되는 전극 공구와 공작물에는 전도성이 있어야 한다. 이에 따라 전기화학가공에 사용되 는 전극 공구는 전도성을 가진 금속 재질의 전극 공구들이 대부분이다. 이러한 금 속 재질의 전극 공구를 복잡한 형상으로 제작할 경우 많은 공정과 시간이 필요하 다. 하지만 전류인가를 통해 공작물과 전극 공구의 금속 용해가 이루어지기 때문에 전도성이 있어야 하며, 이러한 전도성을 가진 전극 공구를 제작하기 위해선 금속 3D Printing을 이용한 전극 공구의 개발이 적합할 것으로 보이나, 연구 목적인 시 간과 비용의 절감 부분에서 큰 기대를 할 수가 없으며, 금속 증착을 통한 전극 공 구의 제작 역시 마찬가지로 비용절감을 기대할 수가 없다. 따라서 전도성을 부여하 기 위한 방법 중 전극 공구에 전도성 코팅제를 이용하여 전도성을 부여하고자 한 다. 전도성 코팅제를 이용하여 실제 제품처럼 사용하는 연구가 진행되고 있으며, Tak`s group에서는 3D Printing으로 X-밴드 안테나를 제작하여 전도성 코팅제 중 전도성 스프레이를 이용하여 전도성을 부여하였다. 전도성 스프레이의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 통해 전도성 스프레이가 기존 금속의 전도성 만큼의 성능을 가지는 것을 확인하였다.¹⁸⁾ 이와 같이 기존 금속의 성능을 가지는 전도성 코팅제를 이용하여 전극 공구를 제작하고자 하며, Fig.2는 전극 공구의 제 작 과정을 보여준다. 전극 공구의 제작 공정과 시간을 단축하기 위해서 3D Printing을 통한 전극 공구 제작을 하며, 비용 절감을 위해 금속 3D Printing이 아 닌 Non-metal 3D Printing으로 출력된 전극 공구를 전도성 코팅을 통해 자유 형 상 전극 공구를 제작하고자 한다. 이러한 전도성을 부여하는 방법에는 여러 방법이 있지만 저렴한 비용의 전극 공구의 제작을 위해 시중에서 판매되고 있는 전도성 코팅제들을 이용하고자 한다.

Collection @ chosun

- 4 -



따라서 본 연구에서는 금속 전극 공구를 이용한 ECM이 아닌 FDM 방식의 3D Printer를 통해 ABS재질에 전도성 코팅된 전극 공구를 ECM에 이용하고자 한다. 또한 3D Printing을 통해 제작된 전극 공구의 성능을 알아보기 위하여 금속 전 극 공구를 이용한 ECM을 통해 가공성능을 비교하고자 하며, 더 나아가 복잡한 형 상의 전극 공구의 제작 및 ECM을 통해 복잡한 형상의 제작 시 발생하는 비용과 시간을 절감할 수 있는 전극 공구를 제작하고자 한다. 또한 일회성으로 사용되는 전극 공구가 아닌 지속적으로 사용 가능한 전극 공구를 제작하고자 하며, 제작된 전극 공구들을 이용한 ECM에 대한 분석을 통해 가공에 대한 파라미터를 제시하고 자 한다.



Fig.2 Process of fabricating electrode tool for ECM





제 2 장 실험장치 설계 및 실험방법

2-1 관련이론

Collection @ chosun

가. 전기화학가공(Electrochemical machining)

ECM은 패러데이의 원리에 따라 전기화학 용해에 의해 가공물의 원자를 제거하는 가공법 중 하나이다.

이러한 패러데이의 법칙에 의해 ECM은 이루어지며, ECM에 대한 원리는 다음 과 같다. 일반적인 ECM은 높은 전류밀도와 낮은 전압을 사용하며, 전극 공구는 음 극(Cathode)이 되고, 공작물은 양극(Anode)이 된다. 전류는 전극 공구와 공작물 사이에 전해액을 통과하며, 전해액은 가공 시 발생하는 금속 용해물, 열, 버블 등을 제거한다.

ECM은 다음과 같이 정의된다.¹⁵⁾ ECM시 전해액을 NaCl을 사용하여 철의 용해 반응을 나타내면 다음과 같은 수식이 된다.

$$H_2O \rightarrow H^+ + OH^- \tag{2.1}$$

$$NaCl \rightarrow Na^{+}+Cl^{-}$$
 (2.2)

여기서 음이온 OH⁻와 Cl⁻는 양극으로 움직이고, 양이온 H⁺와 Na⁺는 음극으로 되며, 양극에서 Fe는 두 개의 전자를 잃으며 다음과 같이 변한다.

$$Fe \rightarrow Fe^{++}+2e$$
 (2.3)

음극에서는 수소 가스와 수산화 이온이 생성되는 반응이 일어나며 다음과 같은 수식으로 정리된다.

$$2H_2O + 2e \rightarrow H_2 + 2(OH)^-$$
 (2.4)

이러한 전기화학반응은 철 이온이 수산화 이온과 결합하여 수산화철로 침전되는 것이며 다음과 같이 정리된다.

$$Fe+2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2+H_2$$
 (2.5)

수산화철은 물이나 산소에 반응하여 다른 원자를 형성하며, 이러한 금속-전해액 의 조합으로 단순화되는 반응이 일어난다.



Fig.3은 ECM의 원리를 보여주는 개략도로 지속적인 전해액 공급을 위해 전극 공구 가운데에 전해액이 통과할 수 있는 홀을 별도로 제작하는 것이 바람직하며, 가공이 일어나는 것을 전해액에서 이온의 움직임에 의해 확인할 수 있다.

또한 패러데이의 법칙(Faraday`s law)에 의해 ECM의 금속 제거량은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$m = \frac{A\,lt}{zF} \tag{2.6}$$

A: Atomic weight

I : Current

t : Machining time

z : Valency

F : Faraday`s constant

 $\dot{m} = \frac{A}{z}$ 은 단위시간당 금속 제거율을 나타낸다. 여기서 $\frac{A}{z}$ 은 등가전기화학량을 나타낸다.

하지만 이론상의 금속 제거율은 실제 가공 시 전류밀도, 전압, 가공 시간 등 파 라미터의 따라 실제와 차이를 보이며, 이에 따라 가공 후 측정을 통해 비교가 필요 하다. 이러한 ECM이 발전하여 가공 정밀도를 향상시키기 위해 Micro-ECM이 개 발되었으며,¹⁹⁾ ECM의 정밀도를 높이고자 Pulse를 인가하여 ECM을 진행하다.^{9,10)} Fig.4는 Pulse의 원리를 보여주며, 연속적인 전류가 흐르는 직류의 경우 전극 공구 에 지속적으로 열이 집중되지만 Pulse가 인가되면 Off-time의 경우 전기화학반응 이 일어나지 않아 전해액이 주입될 때 금속이온, 열, 버블 등이 빠져나가게 되며, 이는 ECM에서 금속이온과 버블 등에 의해 원활하지 못하던 가공을 개선할 수 있 다.





Fig.3 Principal of ECM



Fig.4 Graph of pulse waveform





나. FDM 3D Printer

FDM은 두 개의 드라이브 휠 사이로 3D Printer의 재료인 원형의 필라멘트를 열로 가열된 Extruder에 지속적으로 주입시켜 출구에서 분출되는 방식이며, Fig.5 는 FDM 방식의 개략도를 보여준다. 대부분의 FDM 3D Printer는 한 종류의 필라 멘트를 사용하여 제작에 필요한 서포터를 생성하며, 이러한 경우 서포터를 제거하 는 과정에서 표면 상태가 좋지 않으며, 문제점을 개선하기 위해서 3D Printing의 재료와 서포터의 재료를 각각 사용하여 제작 정밀도를 높였다. FDM 3D Printer 에서 대중적으로 많이 사용되는 재질은 Poly lactic acid(PLA)와 Acrylonitrile butadiene styrene(ABS)을 사용되며, 본 연구의 전극 공구의 제작에도 이용된다. ABS의 경우 PLA보다 열에 강하며, 230℃까지 견딜 수 있는 내열성을 가지고 있 는 것이 장점이다. 이러한 플라스틱 재질뿐만 아니라 여러 소재를 FDM방식으로 출력하기 위한 연구가 진행되고 있다.²⁰⁾



Fig.5 Schematic diagram of FDM 3D printer



2-2 실험 장치 설계 및 제작

제작된 전극 공구를 이용하는 ECM으로 기본적인 장치 구성은 Fig.6과 같다. ECM은 전해액이 사용되며, 전해액의 경우 전기적으로 중립적인 성질을 가지고 있 어야 하며, 부식성분이 있는 NaNO3을 사용하기 때문에 프레임의 경우 표면에 Anodizing 처리가 된 AL-Profile을 사용하여 프레임을 제작하였다. 본 연구에서 는 전극 공구를 Z축으로 가공하며, Actuator를 이용하여 1축으로 가공하기 때문에 프레임을 높게 설치하여 공작물을 수직으로 가공하고자 한다. 실험 장치 제작에 사 용된 Actuator는 삼익 THK사의 SKR20을 사용하였으며, Actuator 이송을 위해 Stepping motor을 이용하여 정밀하게 움직이고자 하였다. 또한 Actuator는 리드 가 1mm인 정밀이송이 가능한 Actuator이며, 별도의 컨트롤러를 이용하여 Actuator의 전체적인 움직임을 제어하였다. Actuator의 이송을 위해 사용되는 Stepping motor는 Pulse 신호를 통해 움직이며, 분해능은 2µm, 최대 속도는 20mm/s, 정확도는 5μm의 성능을 가지고 있다. 또한 Rotation stage와 Tilt stage 를 설치하여 ECM을 진행할 때 전극 공구와 공작물의 수평을 맞추는데 이용하고자 한다. ECM을 위해 별도의 전극 공구 홀더를 제작하여 전극 공구의 고정하였으며, Rotation stage와 Tilt stage는 마운트를 제작하여 Actuator에 설치하였다. Tilt stage와 전극 공구 홀더를 결합하여 공작물과 전극 공구의 수평을 맞춤을 통한 가 공 정밀도를 향상시키고자 하였다. Actuator는 Poly-carbonate(PC)를 이용하여 프레임에 부착하였다. 또한 전해액의 지속적인 공급으로 인해 부식이 발생할 수 있 으므로, 비접촉식 펌프인 연동펌프를 이용하여 전극 공구에 전해액을 주입하고자 하였으며, 가공 중 생성되는 용해물의 필터링을 통해 재사용하고자 한다. Photo.1 은 제작이 완료된 ECM stage로 1축 이송을 통해 공작물을 가공하고자 한다. 또한 공작물의 고정을 위해 별도의 공작물 홀더를 제작하였으며, 공작물 홀더의 고정을 위해 전해액 탱크의 바닥면에 홈을 설치하여 고정을 하였다. 전해액 탱크에는 별도 의 튜브 피팅을 하여 전해액이 지속적으로 순환되게 하였다. 실험 장치의 바닥면에 고무를 부착하여 실험 장치의 진동에 의한 흔들림을 제어하였다.





Fig.6 Schematic diagram of ECM



Photo.1 Equipment of ECM stage





2-3 실험 방법

본 실험에서는 사용되는 공작물은 STS304 재질의 25×25mm, 5mm 두께의 사각시편을 사용하였다. 실험 전 STS304의 표면의 피막과 불순물들을 제거하기 위하여 Polishing을 통해 표면을 연마하였으며, 초음파세척기를 이용하여 아세톤에 1분 동안 침지시킨 상태에서 초음파세척을 실시하였다. ECM에 사용되는 전해액은 NaNO₃을 이용하였으며, 전해액의 온도는 Heat-pipe를 이용하여 30℃ 전후로 유 지하였다. 공작물과 전극 공구의 간극은 Gap gauge를 이용하여 간극을 설정하였 으며, 공작물을 가공하기 위해 목표 깊이에 맞춰 Actuator를 이용하여 전극 공구 를 이송할 수 있도록 설정하였다. 또한 전극 공구의 가공면을 제외한 부분엔 절연 처리를 하여 가공 정밀도를 향상시키고자 하였으며, 연동 펌프를 이용하여 지속적 으로 전해액이 공급 될 수 있도록 하였다. 전극 공구와 공작물에는 Pulse power supply를 이용하여 전류가 인가되며, On-Off time을 조절하여 ECM을 하고자 한 다. Oscilloscope를 통해 가공 중 전류의 인가상태를 확인한다. 가공 시간은 500 초, 가공 속도는 2µm/s로 설정하였다. 가공 중 사용된 전해액은 재사용을 위해 필 터링 후 다시 전해액 탱크에 주입되어 재사용한다. 이러한 방법으로 ECM을 진행 하였으며, 가공이 완료되면 가공 깊이 및 직경의 측정을 통해 가공성을 확인하였 다. Table.1은 실험조건을 나타내는 표이다.

Workpiece	STS304
Original electrode	Cu
Conductive coating electrode tool	SCC, Ni-coating, Silver paste
Electrolyte	NaNO ₃
Duty factor	50%
Electrolyte temperature	30°C
Machining speed	2µm/s

Table.1	Experimental	conditions
1 001011	Bripermentar	conditions





제 3 장 전극 공구 제작

3-1 전극 공구 제작

ECM에 사용하기 위한 전극 공구 제작은 Fig.7과 같이 진행하였다. 설계 프로그 램을 이용하여 전극 공구를 설계하였고, FDM 3D Printer를 이용하여 전극 공구 형상을 출력하고자 한다. 설계 시 전극 공구 내에서 전해액이 통과될 수 있어야하 며, 전극 공구 가공면에 전해액이 나올 수 있도록 하였다. 설계가 완료되면 3차원 프린팅을 위한 파일변환을 진행하였으며, 3D Printing 시 서포터를 최소화하는 방 향으로 출력을 진행하였다. 3D Printing 시 PLA 재질의 경우 강도가 약하여 전해 액 공급을 위한 Tube fitting을 설치하는데 어려움이 있고, ABS보단 열에 약하다 는 단점으로 인해 PLA 대신 ABS 재질을 사용해서 전극 공구를 제작하고자 한다.

이러한 방법으로 출력된 전극 공구에 전해액이 공급 될 수 있도록 Tube fitting 을 하였으며, 전해액의 지속적인 공급이 될 수 있도록 하였다. 두 번째 과정으로 3D Printing으로 출력된 전극 공구 형상에 전도성 코팅을 한다. 전도성 코팅제에 따라 Aerosol 유형은 분사를 통하여 전도성 코팅을 하였고, 액상 유형의 전도성 코팅제는 Brush를 이용한 Painting을 통해 전극 공구에 코팅을 하였다. 전도성 코 팅이 완료된 전극 공구에 가공정밀도 향상을 위해 절연코팅을 하여 전극 공구를 제작하였다. Fig.8은 전극 공구의 전도성 코팅층의 개략도를 보여주며, 전극 공구 의 중앙 홀은 전해액이 주입될 수 있도록 하였고, 제작 순서에 맞게 전도성 코팅 후 절연코팅을 하여 전극 공구를 제작하고자 한다.







Fig.7 Processes of fabricating conductive coated electrode tool











3-2 전도성 코팅 분석

3D Printing을 통해 제작되는 전극 공구는 플라스틱 재질의 ABS를 사용하기 때 문에 전도성이 없어 ECM에 이용할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 ABS 재질의 전극 공구에 전도성 코팅을 하여 ECM에 이용하고자 한다. 전도성 코팅제 의 종류는 여러 가지의 종류가 있으며 그 중 3개를 선정하여 ECM에 적용하고자 한다. 먼저, 첫 번째로 전극 공구 제작에 이용할 전도성 코팅제는 MG chemical 사의 Silver Coated Copper conductive coating(SCC)이며, 주성분이 구리와 은 으로 된 코팅제를 이용하여 전극 공구를 제작하였다. 전도성 코팅제는 Aerosol 유 형으로 멀티미터를 이용한 전도도 측정 결과 전도성이 있는 것을 확인하였다. Fig.9는 Sheet resistance 측정을 위한 시편의 제작과정이다. Fig.9 (a)는 aerosol 타입의 SCC를 이용하여 시편의 표면에 분사하여 충분한 코팅 될 수 있도 록 하였다. 전도성 코팅은 5분 단위로 분사하였으며, 24시간이 지나면 완전히 경 화된 전도성 코팅의 Sheet resistance를 측정하고자 한다. 두 번째로 사용한 코팅 제는 MG chemical사의 Conductive nickel coating(Ni-coating)이며, 주성분이 Ni이다. Ni-coating도 SSC와 마찬가지로 Aerosol 유형으로 측정을 위한 시편의 제작과정은 SCC를 이용한 시편 제작과정과 동일하다. 마지막으로 이용한 전도성 코팅제는 CANS사의 El-coat silver paste p-100을 이용하였으며, 앞서 두 코팅 제와 다르게 액상형태로 Fig.9 (b)와 같이 Brush를 이용하여 Sheet resistance 측정을 위해 시편에 코팅을 하였다. 경화시간은 24시간으로 동일하며 완전 경화가 된 후 Sheet resistance를 측정하고자 한다.



세 종류의 전도성 코팅을 비교하기 위해 Sheet resistance를 측정하고자 하 며,²¹⁾전도성 코팅의 두께에 따라 측정을 하고자 한다. Sheet resistance 측정은 Napson사의 PEL-3000의 4-point probe를 이용하여 임의의 5-point를 측정하 여 평균 Sheet resistance를 알아보고자 하며, 코팅층의 두께도 5번의 측정을 통 해 평균 두께를 알아보고자 하였다. 이러한 측정결과를 토대로 코팅 횟수에 따라 전도성 코팅의 평균 Sheet resistance 변화를 알아보고자 하며, Sheet resistance 측정 후 Scanning Electron Microscope(SEM)측정을 통해 입자 크 기와 Energy Dispersive Spectrometer(EDS) 분석을 진행하였다.



Fig.9 Processes of preparing substrate for sheet resistance and thickness measurement (a)spraying (b)painting





먼저 SCC에 대한 측정결과이다. 두께의 경우 1회 분사일 때는 평균 두께는 약 0.059mm로 적층되었으며, 2회 분사 이후로는 두께가 증가하였다. 1회 분사하여 코팅하였을 때 측정된 평균 Sheet resistance는 평균 1.08Ω/sq로 측정되었으며, 2회 코팅에선 평균 0.065Ω/sq로 낮아 진 것을 확인할 수 있었다. 분사 횟수의 증 가에 따라 두께는 증가하면서 Sheet resistance는 낮아지는 형태이며, Fig.10은 SCC의 분사 횟수에 따라 Sheet resistance와 두께를 보여주는 그래프이다. Sheet resistance의 경우 3회 이후부턴 최저치로 낮아진 것을 확인할 수 있다.

Fig.11은 SEM으로 측정한 SCC이며, (a)는 500배율, (b)은 3000배율에서 측 정한 이미지이다. 측정을 통해 확인한 결과 30~50µm 크기의 입자들이 적층되어 붙어있는 것을 확인할 수 있다. Fig.12는 SCC의 성분을 분석한 그래프이며, Cu가 81%, Ag가 12.5%, O가 6%의 분포를 보였다.



Fig.10 Relationship between sheet resistance and thickness of SCC for number of spray







Fig.11 SEM image of surface conductive coated with SCC (a)500 \times (b)3000 \times



Fig.12 Analysis of SCC using SEM-EDS





두 번째로 측정한 Ni-coating의 경우 1회 분사 후 평균 두께는 약 0.016mm로 SCC보다 낮은 두께로 코팅되었으며, 이전 SCC와 마찬가지로 2회 분사 이후부터 두께가 증가하였다. Sheet resistance 경우 1회 분사의 경우 평균 1.73Ω/sq로 측정되었으며, 2회 분사의 경우 평균 0.38Ω/sq로 측정되었다. Fig.13은 Ni-coating의 분사횟수에 따른 두께와 Sheet resistance에 대한 그래프를 보여주 며, 분사 횟수에 따라 두께는 증가하고, Sheet resistance는 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 같은 Aerosol 유형의 SCC와 비교하였을 때는 Ni-coating의 Sheet resistance가 높으며, 두께의 경우 분사횟수에 비해 낮은 것을 확인 할 수 있다.

Fig.14는 Ni-coating에 대한 SEM을 이용한 측정결과이며, (a)는 500배율, (b) 은 3000배율에서 측정한 이미지이다. 측정을 통해 확인한 결과 입자의 크기는 약 10~30µm로 측정되었다. Fig.15는 Ni-coating의 성분을 분석한 그래프이며, Ni가 100%의 분포를 보였다.



Fig.13 Relationship between sheet resistance and thickness of Ni-coating for number of spray







Fig.14 SEM image of surface conductive coated with Ni-coating (a) 500 \times (b) 3000 \times



Fig.15 Analysis of SCC using SEM-EDS



마지막으로 Silver paste의 경우 두께와 Sheet resistance가 일정하지 않은 이 유는 이전 에어로졸 유형과 다르게 Brush를 이용하여 Silver paste의 두께를 증가 시키고자 하였기 때문에 SCC, Ni-coating과는 다르게 균일한 코팅이 되지 않았 다. Sheet resistance 측정 결과 1회 분사의 경우 평균 0.43Ω/sq로 측정되었으 며, 2회 분사의 경우 평균 0.27Ω/sq로 측정되었다. Fig.16은 Silver paste의 페 인팅 횟수에 따른 두께와 Sheet resistance에 대한 그래프를 보여주며, 분사 횟수 에 따라 두께는 증가하고, Sheet resistance는 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. SCC, Ni-coating 과 같이 코팅횟수가 증가할수록 Sheet resistance가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. Fig.17은 Silver paste에 대한 SEM을 이용한 측정결과 이며, (a)는 500배율, (b)은 3000배율로 측정한 이미지이다. 측정을 통해 확인한 결과 입자의 크기는 10~20㎞의 크기로 측정되었다. Fig.18은 Silver paste의 성 분을 분석한 그래프이며, Ni-coating과 마찬가지로 Ag가 100%의 성분을 가졌다. 이와 같은 방법으로 전도성 코팅의 분석을 하였으며, SCC가 코팅 횟수별 Sheet resistance가 가장 낮았으며, 두께의 경우 Silver paste가 가장 얇은 두께를 가진 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 토대로 전도성 코팅별로 전극 공구를 제 작하여 ECM을 하고자 한다.



Fig.16 Relationship between sheet resistance and thickness of silver paste number of painting





Fig.17 SEM image of surface conductive coated with silver paste (a)500 \times (b)3000 \times



Fig.18 Analysis of silver paste using SEM-EDS

3-3 전도성 코팅에 따른 ECM 및 분석

전도성 코팅에 따른 ECM을 통해 적합한 코팅제를 선정하고자 하며, 가공은 SCC, Ni-coating, Silver paste순으로 가공을 진행하였다. 전극 공구의 직경은 8mm이며 20% 농도의 NaNO3을 사용하여 9.9A/cm의 전류밀도를 인가하였다. 또 한 가공면을 제외한 부분에 절연처리를 하였으며, 전극과 공작물의 간극은 60µm이 며, 전극 공구의 이송속도는 2µm/s로 설정하여 목표 가공 깊이는 1mm로 설정하였 다. Fig.19는 SCC 코팅이 된 전극 공구를 ECM에 이용한 이미지이며, (a)는 ECM 전 전극공구, (b)는 ECM 후 전극 공구의 상태를 보여준다. (c)는 SCC 코 팅된 전극 공구를 이용한 ECM 샘플의 이미지이며, 실험결과 가공은 잘 되지 않았 다. 가공시간이 100초 정도 지나자 전류가 인가되지 않아 원인을 분석하기 위해 전극 공구를 확인해본 결과 SCC 전극 공구의 코팅 표면에 Burning과 Crack이 발 생하여 더 이상의 전류를 인가가 되지 않았으며, 전극 공구의 재사용이 되지 않았 다. 공작물 또한 가공이 되지 못하고 공구 형상도 유지하지 못하였다. Fig.20은 Ni-coating이 된 전극 공구를 이용한 ECM에 관한 이미지이며, (a)는 ECM 전 전 극공구, (b)는 ECM 후 전극 공구의 상태를 보여준다. 열에 의해 Burning 현상이 발생하였으며, 코팅층에 Crack과 휨 현상이 발생하면서 전극 공구가 손상되었다. (c)는 Ni-coating 전극 공구를 이용한 ECM 샘플의 이미지이며, 120초 정도의 시간이 지난 후 전류는 전혀 인가되지 않았으며, 전극 공구를 확인한 결과 Ni-coating도 SCC와 전극 공구에서 Burning을 확인할 수 있었다. 공작물을 확인 한 결과 가공이 되지 못하고 공구 형상도 유지되지 않았다. 그러나 Silver paste 의 경우 가공이 이루어졌으며, Fig.21의 (b)를 통해 알 수 있듯이 전극 공구를 확 인한 결과 코팅에 약간의 Burning이 발생되었으나 전류의 인가는 잘 이루어 졌으 며, Fig.21의 (c)에서 확인할 수 있듯이 공작물 또한 공구형상을 유지하면서 가공 이 되었다.

SCC와 Ni-coating에서 Burning이 발생하는 원인으로 코팅에 대한 성분 분석 시 발견되지 않은 접착제 성분이 ECM을 위해 인가되는 전류가 발생시키는 열을 견디지 못한 것으로 판단된다. 하지만 Silver paste를 이용한 결과 ECM이 되었으 며, 이러한 검증을 통해 본 연구에서는 Silver paste를 사용하고자 한다.





Fig.19 ECM using SCC coated electrode tool (a)electrode tool before ECM (b) electrode tool after ECM (c) machined sample



Fig.20 ECM using Ni-coated electrode tool (a)electrode tool before ECM (b) electrode tool after ECM (c) machined sample



Fig.21 ECM using silver paste coated electrode tool (a)electrode tool before ECM (b)electrode tool after ECM (c)machined sample





제 4 장 구리 전극 공구와 제작된 전극 공구 비교

4-1 구리 전극 공구의 ECM

제작된 전극 공구의 공구 성능을 알아보기 위해 구리 전극 공구와의 ECM 후 가 공을 비교하기 하고자 실험을 진행하였다. Fig.22는 구리 전극 공구이며, 가공 직 경은 5.5mm으로 제작하였다. 전극 공구의 가공면을 제외한 부분에 절연코팅을 하 여 가공정밀도를 향상시키고자 하였으며, 가공에 사용되는 전해액은 20% 농도의 NaNO₃을 사용하였다. 전해액의 온도는 Heat pipe를 이용하여 30℃ 전후로 유지 하였다. 가공 조건으로 목표 가공깊이를 1mm로 설정하였으며, Actuator를 이용한 전극 공구의 이송 속도는 2µm/s, 전류밀도는 4.9, 6.6, 8.2, 9.9, 11.5A/cm를 인가 하여 가공을 진행하였다. 가공이 완료된 공작물의 가공 깊이와 직경은 다이얼 게이 지와 실체현미경을 이용하여 측정을 하였다. 먼저 가공 깊이의 경우 각각의 전류밀 도별로 0.5, 0.9, 1.4, 1.5, 1.4, 1.6mm로 가공이 되었으며, 전류밀도가 증가함에 따라 가공 깊이도 증가하였다. 가공 직경의 경우 6.7, 7.5, 8.9, 7.5, 8.8, 10.3mm 로 가공이 되었으며, 전류밀도가 증가함에 따라 가공 직경도 증가하였다. Table.2 는 전류밀도별 가공된 깊이와 직경을 나타낸다, Fig.23은 전류밀도에 대한 가공깊 이 대한 그래프이며, Fig.24는 전류밀도에 대한 가공 직경에 대한 그래프이다. 전 류밀도가 증가할수록 가공 깊이와 직경도 증가함을 보여준다.



Fig.22 Original electrode tool for ECM





1.6

1.4

using original electrode tool									
Current density (A/cm²)	4.9	6.6	8.2	9.9	11.5	13.2			

1.4

1.5

Table.2	Relationship	between	depth	and	diameter	with	current	density	by
	using origina	al electro	de tool						

Diameter(mm)	6.7	7.5	8.9	7.5	8.8	10.3
1.8					1.200	1

0.9

0.5

Depth(mm)



Fig.23 Depth of ECM using copper electrode tool by current density



Fig.24 Diameter of ECM using copper electrode tool by current density



4-2 제작된 전극 공구의 ECM

제작된 전극 공구와 구리 전극 공구의 가공에 대한 비교하기 위해 제작된 전극 공구를 이용하여 실험을 하였다. 제작된 전극 공구는 3D Printing을 통해 제작되 며, Silver paste로 코팅하였다. 전극 공구의 가공 직경은 5.5mm으로 제작하였다. 구리 전극 공구와 마찬가지로 제작된 전극 공구의 가공면을 제외한 부분에 절연코 팅을 하여 가공정밀도를 향상시키고자 하였으며, 가공에 사용되는 전해액은 20% 농도의 NaNO₃을 사용하였다. 전해액의 온도는 Heat pipe를 이용하여 30°C 전후 로 유지하였다. 가공 조건은 구리 전극 공구를 이용한 가공과 같은 조건으로 목표 가공 깊이는 1mm로 설정하였으며, Actuator의 이송 속도는 2µm/s, 전류밀도는 4.9, 6.6, 8.2, 9.9, 11.5A/c㎡를 인가하여 가공을 진행하였다. Table.3는 전류밀도 별 가공 깊이와 직경을 보여준다.

가공 깊이와 직경의 경우 각각의 전류밀도별로 0.6, 1.0, 1.3, 1.6, 1.5, 1.7mm 로 가공이 되었으며, 전류밀도가 증가함에 따라 가공 깊이도 증가하였다. 가공 직 경의 경우 7.9, 8.0, 8.1, 7.4, 8.7, 9.5mm로 전류밀도에 따라 가공 직경이 증가 하였다. Fig.25는 전류밀도에 대한 가공 깊이에 대한 그래프이며, Fig.26은 전류밀 도에 대한 가공 직경에 대한 그래프이다. 구리 전극공구와 마찬가지로 전류밀도가 증가할수록 가공 깊이와 직경도 증가함을 보여주는 결과이다.





Current density (A/cm²)	4.9	6.6	8.2	9.9	11.5	13.2
Depth(mm)	0.6	1.0	1.3	1.6	1.5	1.7
Diameter(mm)	7.9	8.0	8.1	7.4	8.7	9.5

Table.3 Relationship between depth and diameter with current density by using silver paste coated electrode tool



Fig.25 Depth of ECM using silver paste coated electrode tool by current density



Fig.26 Diameter of ECM using silver paste coated electrode tool by current density





4-3 전극 공구의 가공 비교에 따른 분석

두 전극 공구를 이용하여 ECM 하였으며, 전류밀도의 변화에 따른 가공 직경과 깊이를 측정하였다. 두 전극 공구의 가공 결과를 정량적인 측정을 통한 비교를 하 기 위해 Carl Zeiss사의 Prismo를 이용하여 측정 후 비교하고자 한다.

Fig.27은 전류밀도별 가공된 시편 중 가장 낮은 전류밀도, 중간, 높은 전류밀도 인 4.9A/cm², 8.2A/cm², 13.2A/cm² 순으로 가공 시편을 보여준다. Fig.27(a)은 구리 전극 공구를 이용한 ECM 후 가공된 시편이며, Fig.27(b)은 제작된 전극공구 를 이용한 ECM 후 가공된 시편을 보여준다. 시편의 직경을 비교하면 큰 차이가 없는 것을 확인 할 수 있었으며, 전류밀도가 높아질수록 전극 공구 형상에 가까워 졌다. Fig.28은 낮은 전류밀도인 4.9A/cm²를 인가하여 ECM을 통해 가공된 깊이 에 대해 비교한 그래프이다. 제작된 전극 공구와 그래프의 형태는 유사하지만 구리 전극 공구가 가공이 더 잘 되었으며, 낮은 전류밀도에서는 전도성이 좋은 구리 전 극 공구가 가공이 잘 된 것을 확인할 수 있었다. Fig.29는 높은 전류밀도인 13.2A/cm²를 인가하여 ECM을 통해 가공된 깊이에 대해 비교한 그래프이다. 구리 전극 공구가 낮은 전류밀도에서 전도성이 전도성 코팅보다 우수하여 가공면에서 좋은 결과를 보여 주였으나, 13.2A/cm²에서는 제작된 전극 공구 또한 유사한 형 태의 가공과 그래프를 보여준다. 또한 낮은 전류밀도에서 보이는 Hill-effect는 보 이지 않았다. 기존 전극 공구와 제작된 전극 공구의 가공을 비교한 결과 큰 차이가 없으며, 제작된 전극 공구는 실제 가공에서 기존 전극 공구만큼의 효과를 얻을 수 있다는 것을 보여준다.







Fig.27 Diameter of machined area by current density (a) using original electrode tool (b) fabricated electrode tool







Fig.28 Comparison of depth machined using copper electrode tool and silver paste coated electrode tool at current density 4.9A/cm²



Fig.29 Comparison of depth machined using copper electrode tool and sliver paste coated electrode tool at current density of 16.8A/cm²





제 5 장 자유 형상 전극 공구 제작 및 가공

5-1 파형형상 및 다단형상 제작 및 가공

가. 파형형상 제작 및 가공

4장에서 간단한 원형 형상의 전극 공구를 제작하여 ECM을 통한 기초연구에 대 한 데이터를 확보하였다. 이러한 단순한 형상에서 벗어나 복잡한 형상에 대한 제작 된 전극 공구의 성능을 검증하고자 여러 형상을 제작하고자 하며, 파형형상과 다단 형상 전극 공구의 제작 및 가공을 하고자 한다.

파형형상의 제작은 다음과 같이 진행하였다. Fig.30은 파형형상의 전극 공구의 개략도와 3차원 설계된 파형 형상을 보여주며, 설계 시 볼록한 부분을 A, 오목한 부분을 B로 하였다. 전극 공구의 너비는 15mm이며, 최고점과 최저점의 높이 단차 는 4mm로 설정하였다.

이와 같이 제작된 전극 공구는 다음과 같은 조건에서 가공을 진행하였다. 전해액 은 20% 농도의 NaNO₃을 사용하였으며, 전해액의 온도는 30℃ 전후로 유지하였 다. 목표 가공깊이는 단차의 높이인 4mm만큼 가공하고자며, Table.4 은 전류밀도 를 인가하는 조건이며, 원형 형상과 반대로 전극 공구에 이송에 따라 가공면적이 달라지기 때문에 이송 깊이별 전류밀도의 변화를 주어 가공을 하고자 한다.

실험 결과 가공은 잘 이루어지지 않았다. Fig.31은 가공 후 파형 형상의 전극 공 구와 시편을 보여주며, 가공이 이루어지지 않은 이유는 가공 중 발생하는 버블들과 슬러리가 가공을 방해하며, 작은 면적에 전류가 인가되면서 Silver-paste 코팅에 전류가 집중되어 Burning이 일어난 것으로 판단된다. 따라서 파형형상을 제작할 경우 면적에 따른 전류의 제어를 통한 가공을 가공하거나, 전류밀도를 일정하게 유 지시킨 상태에서 ECM을 해야 될 것으로 판단된다.





Fig.30 Design of waved electrode tool

Table.4 Experimen	tal conditions	of waved	electrode	tool ECN	N
-------------------	----------------	----------	-----------	----------	---

Depth(mm)	A current	B current		
	density (A/cm ²)	density (A/cm ²)		
0.5	0.75	6.8		
1.0	1.33	7.8		
1.5	1.58	9.2		
2.0	2.23	8.9		
2.5	2.43	8.5		
3.0	2.57	8.1		
3.5	2.68	7.6		
4.0	2.65	6.9		



Fig.31 Waved electrode tool after wave electrode tool ECM



다단형상의 경우 9.6×9.6mm 정사각형으로 제작하였으며, 각층의 높이는 2mm와 1mm로 1mm의 단차를 주어 제작하고자 한다. Fig.32(a)는 다단형상에 대한 개략도를 보여주며, Fig.32(b)는 실험 전 현미경을 통한 Silver paste 코팅 된 다단 전극 공구 형상을 보여준다. 다단형상에서 가공조건은 다음과 같이 설정하 였다. 먼저 전해액은 20% 농도의 NaNO₃을 사용하였으며, 전해액의 온도는 30℃ 전후로 유지하였다. 목표 가공깊이는 단차의 높이인 2mm만큼 가공하고자 하였으 며, 전극 공구와 공작물의 간극은 60µm를 주었으며, 전류밀도는 8.3A/m를 인가하 였다. Fig.33은 단차 가공된 시편에 Electrochemical polishing(ECP)을 통한 표 면 품질이 향상됨을 보여주며, Cross section a-a`는 단차 가공된 시편의 단면을 보여준다. ECP 조건은 425Hz에서 전류밀도 1.6A/cm²를 240초 동안 인가하였다. 단면에서 확인할 수 있듯이 단차가공이 된 것을 확인 할 수 있었다. Fig.34는 단차 가공된 시편의 깊이 측정을 한 그래프이며, 단차의 높이는 각각 약 0.9mm의 깊이 와 1.7mm의 깊이가 측정되었다. ECM 후 전극 공구의 Burning 등 전극 공구의 손상여부를 확인하였으나, 전극 공구에는 손상이 없었다. 그러나 단차가 발생되는 가운데 부분은 가공 시 완만해지는 것을 확인할 수 있었으며, 가공 정밀도가 부족 하였지만, 단차 형상의 전극 공구의 제작을 통한 가공이 이루어진 것을 확인 할 수 있었으며, 이러한 방법으로 복잡한 형상의 전극 공구의 제작을 통한 ECM이 가능 하다는 것을 보여준다.



Fig.32 Design of stepped electrode tool







Fig.33 Machined STS304 after ECP and cross-section view of a-a`



Fig.34 Profile of depth machined using stepped electrode tool



5-2 전극 공구 교환을 통한 가공실험

본 연구에서 제작된 전극 공구는 일체형 전극 공구로써 하나의 형상을 가공하기 위해 제작되었다. 하지만 일체형 전극 공구는 형상이 바뀔 때마다 지속적으로 전극 공구를 제작해야 된다는 문제점이 있다. 복잡한 형상을 가공하기 위해 그에 따른 전극 공구를 제작할 경우 많은 공정이 필요하며, 따라서 이러한 문제를 해결하기 위에 전극 공구의 가공 형상 끝단을 별도로 제작을 통해 전극 공구 교환하는 방법 을 통해 전극 공구를 사용하고자 한다. Fig.35는 전극 공구 교환에 대한 개략도를 보여주며, 전극 공구의 교환 부분은 전극 공구에 별도의 홀을 제작하여 볼트로 고 정하여 ECM에 사용하고자 한다. 또한 가공 성능을 알아보기 위해 ECM을 진행하 였다. 교환 부분에 Silver paste를 이용하여 전도성 코팅을 하였으며, 가공면을 제 외하고 절연처리를 하였다. Fig.36은 제작된 전극 공구를 보여준다. 기존 일체형으 로 된 전극 공구보다 전극 공구의 끝단만 제작할 경우 기존 시간보다 7배 빠른 시 간에 제작이 가능하다. 가공 성능을 알아보고자 ECM을 진행하였으며, 전해액은 20% 농도의 NaNO3을 사용하였고, 공작물의 크기는 25×25mm, 5mm 두께의 STS 304를 사용하였다. 가공 직경은 5.5mm이며, 목표 가공 깊이는 1mm, 전극 공구와 공작물의 간극은 60µm, 이송 속도는 2µm/s로 설정하였다. 인가되는 전류밀 도는 6.3, 8.4, 10.5, 12.6, 14.7, 16.8A/m를 인가하였다. 가공 결과는 Table.5는 전류밀도별 가공깊이를 결과이며, Fig.37은 전류밀도별 깊이에 대한 그래프이다. 전류밀도가 증가 할수록 목표 깊이인 1mm에 근사한 가공이 이루어졌다. 이러한 전극 공구의 교환 방법을 이용한 ECM 결과 일체형 전극공구와 가공 성능은 큰 차 이가 없는 것을 확인할 수 있으며, 전극 공구의 손상 또한 발생되지 않았다.

따라서 전극 공구 교환을 통해 제작비용과 시간을 더욱 절약할 수 있을 것으로 판단된다.



- 37 -





Fig.35 Process of replacement electrode tool fabrication



Fig.36 Replacement electrode tool coated with silver paste





Current density(A/cm²)	6.3	8.4	10.5	12.6	14.7	16.8
Depth(mm)	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1

Table.5 Result of ECM using replacement electrode tool with silver paste coated



Fig.37 Depth of ECM for electrode tool changer by current density



제 6 장 결 론

본 연구는 3D Printing을 기반으로 전극 공구 제작을 통한 ECM에 관한 연구이 다. 실험 결과 3D Printing 된 전극 공구에 전도성 코팅을 하여 ECM이 가능함을 확인할 수 있었으며, 전도성 코팅 종류별 ECM을 통해 적합한 전도성 코팅을 확인 할 수 있었다. 또한 구리 전극 공구와의 비교를 통하여 제작된 전극 공구가 기존 구리 전극 공구만큼의 성능을 낼 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 자유 형상가공 또한 ECM이 가능하며, 복잡한 형상을 빠르게 제작 할 수 있 다는 것을 보여준다. 또한 전극 공구의 교환을 통해 더욱 빠르게 공구의 제작이 가 능하다는 것을 확인 할 수 있었으며, 이와 같이 3D Printing 기반 전극 공구 제작 에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 본 연구에서 사용한 전도성 코팅의 종류는 SCC, Ni-coating, Silver paste를 사용하였으며, 전도성 코팅에 따른 분석 결과 코팅 횟수에 따른 Sheet resistance를 확인한 결과 SCC가 가장 낮았으며, 코팅 횟수에 따른 두께가 가 장 얇은 것은 Silver paste였다.
- 2. 전도성 코팅별 ECM을 한 결과 SCC와 Ni-coating에서 Burning 현상이 발생 하여 전류가 인가되지 못하였지만, Silver paste에선 Burning 현상과 전극 공 구의 손상이 적고, 원활한 가공이 이루어졌다. 따라서 Silver paste를 이용하는 것이 전극 공구 제작에 가장 적합하다.
- 제작된 전극 공구의 가공 성능을 알아보기 위하여 기존에 사용되던 구리 전극 공구와 같은 조건에서 가공한 결과 공구 형상을 유지하면서 가공이 되었다. 또 한 두 전극 공구를 이용하여 가공된 시편을 비교한 결과 가공 깊이나 직경은 큰 차이가 없었다. 따라서 제작된 전극 공구 역시 ECM에서 기존 금속 공구와 같은 충분한 역할을 할 수 있는 것을 확인하였다.



4. 단순한 형상이 아닌 복잡한 형상에서도 ECM에 적합한지 확인하기 위하여 전극 공구의 형상을 파형형상과 다단형상을 제작 후 가공하였다, 파형형상의 경우 전 극 공구에 Burning현상이 발생한 것으로 보아 공작물의 접촉면이 적기 때문에 적절한 전류밀도 인가가 필요하며, 다단형상의 경우 공구 형상을 유지하면서 가 공이 되었고, ECP를 통한 표면품질 개선도 이루어졌다. 따라서 복잡한 형상의 경우 ECM을 하기 위해선 적절한 전류밀도의 인가가 필요할 것으로 판단된다. 또한 일체형 전극 공구를 제작하기보다 가공부만 별도로 제작하여 전극 공구의 교환을 통해 기존의 전극 제작시간보대 7배 빠른 시간으로 제작 시간을 단축하 였으며, 전극 공구 교환을 이용하여 ECM 결과 기존 제작 전극 공구와 큰 차이 는 없었다는 것을 확인 할 수 있었다.

이러한 전극 공구의 제작을 ECM에서 복잡한 형상 가공을 위해 전극 공구의 제 작 과정에서 많은 시간과 비용이 발생하였던 기존의 방식을 해결할 수 있다. 따라 서 고객 맞춤형 제품 생산이 가능하며 다양한 종류의 제품을 소량 생산이 적합하 며, 또한 이러한 전극 공구의 제작 방식은 생산제조 분야에 크게 기여 할 것으로 판단된다.





참 고 문 헌

- 1. V. N. Gusev, L. A. Rozhkov, Authors Certificate 2838, 1928
- J. A. McGeough, "Principles of Electrochemical Machining", Chapman and Hall, London, 1974
- K.P. Rajurkar, D. Zhu, J.A. McGeough, J. Kozak, A. De Silva, "New developments in electrochemical machining", Annals of the CIRP Vol.48, pp.567-579, 1999
- Lohrengel, M. M., Rataj, K. P., and Munninghoof, T., "Electrochemical Machining-Mechanisms of Anodic Dissolution," Electrochim. Acta, Vol.201, pp. 348-353, 2016
- Tomoyuki. S, Masanori. K, "Study on influences of bubbles on ECM gap phenomena using transparent electrode", Annals of th CIRP, Vol.65, pp.225-228, 2016
- Kloke, F., Zeis. M., Harst. S., Klink. A., Veselovac. D., Baumgartner. M., "Modeling and simulation of the electrochemical machining material removal process for the manufacture of aero engine components", 14th CIRP conference on modeling of machining, Vol.8 pp.265-270, 2013
- Gomez-Gallegos, A., Mill, F., Mount, A. R., Duffield, S., and Sherlock, A., "3D Multiphysics Model for the Simulation of Electrochemical Machining of Stainless Steel(SS316)," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol.95, No.5, pp. 2959-2972, 2018
- Fang, X. L., Zou, X. H., Chen, M., and Zhu, D., "Study on Wire Electrochemical Machining Assisted with Large-Amplitude Vibration of Ribbed Wire Electrodes," CIRP Ann-Manuf. Technol., Vol.66, No.1, pp. 205-208, 2017.
- K. P. Rajukar, J. Kozak, B. Wei, J. A. Mcgeough, "Study of pulse electrochemical machining characteristics", Annals of CIRP, Vol.42, pp.231-234, 1993



- J. Kozak, K. P. Rajurkar, B. Wei, "Modelling and analysis of pulse electrochemical machining", Journal of engineering for industry, Vol.116, pp.316-323, 1994
- Lee, E. S., Park, J. W., and Moon, Y. H., "A study on Electrochemical Micromachining for Fabrication of Microgrooves in an Air-Lubricated Hydrodynamic Bearing," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol.20, pp. 720-726, 2002.
- Goudon. Liu, Yong. L., Quancun. Kong., Hao. T., Hao. Zhong., "Silicon-based tool electrodes for micro electrochemical machniing", Precision Engineering, Vol.52, pp.425-433, 2018
- Tomohiro. K, Akira. H, Ryota. Ia, Takashi. U., "Electrochemical machining using porous electrodes fabricated by powede bed fusion dditvie manufacturing proess" Annal of CIRP, Vol.66, pp.213-216, 2017
- Mary. K. T, Giovanni. M, Tom. V, Georges. F, R. I. C, Ian. G, Alain. Bernard, Joachim. S, Patricia. Graf, Bhrigu. A, Filomeno. M, "Design for additive manufacturing : trends, opportunities, considerations, and constraints", Annals of CIRP, Vol.65, pp.737-760, 2016
- 15. Hassan. El-Hofy, "Advanced Machining Process", 2005
- Arenas, L. F., Ponce de Leon, C., and Walsh, F.C., "3D-Printed Porous Electrodes for Advanced Electrochemical Flow Reactors: A Ni/Stainless Electrode and its Mass Transport Characteristics," Electrochem. Commun., Vol.77, pp. 113-137, 2017.
- Victor V. L, Vladimir M. V, Ulrich. M, Inna. V. G, Alexey S. I, "Investigation of plastic electrodes tools for electrochemical machining of silicon", Annal of CIRP, Vol.47, pp.546-556. 2017
- Tak, J. P., Kang, D. Gu., and Choi. J. H., "A Lightweight Waveguide Horn Antenna Made Via 3D Printing and Conductive Spray Coating," Microw. Opt. Technol. Lett., Vol.59, No.3, pp. 727-729, 2017.





- McGeough. J, "Micromachining of engineering materials", CRC Press, 2001
- 20. P. Dudek, "FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements", Archives of metallurgy and materials, Vol.58, 2013
- 21. F. M. Smits, "Measurement of sheet resistivities with th four-point probe", Bell labs technical journal, 1958

