



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019년 2월
석사학위논문

외부 자기력에 의해 가공방향 제어가 가능한 전기화학가공에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

신 승 식

외부 자기력에 의해 가공방향 제어가 가능한 전기화학가공에 관한 연구

A study on the electrochemical machining of machining
direction controllable electrode by external magnetic
force

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

신 승 식

외부 자기력에 의해 가공방향 제어가 가능한 전기화학가공에 관한 연구

지도교수 박 정 우

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2018년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

신 승 식

신승식의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 이 동 기 ㉠

위 원 조선대학교 교수 조 창 현 ㉠

위 원 조선대학교 교수 박 정 우 ㉠

2018년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
ABSTRACT	IV
제1장 서 론	1
1-1 연구배경	1
1-2 연구내용 및 방법	3
제2장 이론적 배경	4
2-1 전기화학가공	4
2-2 자기력 계산(Gilbert Model)	7
제3장 실험 장치 제작	9
3-1 자기력 분석	9
3-2 실험 장치 제작	15
제4장 실험 내용 및 결과	17
4-1 원통형 전극 공구	17
4-2 구형 전극 공구	30

제5장 결 론34

참 고 문 헌

LIST OF TABLES

Table.1 Relationship between distance and magnetic force	11
Table.2 Experimental conditions of ECM process using cylindrical electrode tool on STS304 Mesh	21
Table.3 Experimental conditions of ECM process using cylindrical electrode tool on STS304 5T	22
Table.4 Experimental conditions of ECM process using cylindrical electrode tool on STS304 0.3T double layers	24
Table.5 Result of ECM using cylindrical electrode tool on STS304 Mesh	26
Table.6 Result of ECM using cylindrical electrode tool on STS304 5T	28
Table.7 Experimental conditions of ECM process using spherical electrode tool on STS304 0.3T double layers	32

LIST OF FIGURES

Fig.1 Conventional process of internal machining	3
Fig.2 Schematic diagram of ECM system	5
Fig.3 Equipment of magnetic force measurement	10
Fig.4 Relationship between distance and magnetic force	11
Fig.5 Principle of electrode movement	11
Fig.6 Measurement of minimum magnetic force to move electrode	12
Fig.7 Repulsive force and attractive force between a magnetic electrode and external magnets according to distance using Gilbert model ..	12
Fig.8 Total force of repulsive force and attractive force between a magnetic electrode and external magnets according to distance ...	13
Fig.9 Total force of repulsive force and attractive force between a magnet inserted electrode and 3 conditions of external magnets according to distance	14
Fig.10 Schematic diagram of ECM	15
Fig.11 Workpiece and electrode tool	16
Fig.12 Equipment of ECM stage	16
Fig.13 Process of Cylindrical Electrode fabrication	18
Fig.14 Comparison of non-cold acetone vapor finished electrode body and cold acetone vapor finished electrode body	18
Fig.15 Shape of Cylindrical electrode tool	19
Fig.16 Cylindrical electrode tool	19
Fig.17 Schematic of 1-axis ECM process using cylindrical electrode	21
Fig.18 Schematic of 2-axis ECM process using cylindrical electrode tool	23
Fig.19 STS304 0.3T double layers workpiece	24
Fig.20 Machined hole after ECM using cylindrical electrode tool on STS304 Mesh	25
Fig.21 (a) SCC coated Cylindrical electrode tool condition and (b) Silver	

paste coated Cylindrical electrode tool condition after machining 27

Fig.22 Machined hole with (a) 1.6 A/cm² , 1hour, (b) 3.2 A/cm² , 1hour, (c) 4.2 A/cm² , 1hour and (d) 4.2 A/cm² , 4hour using cylindrical electrode tool on STS304 5T 28

Fig.23 Workpiece after 2-axis ECM using cylindrical electrode on STS 304 0.3T double layers 29

Fig.24 Process of Spherical Electrode fabrication 30

Fig.25 Spherical Electrode tool 31

Fig.26 Workpiece after 2-axis ECM using Spherical electrode on STS304 0.3T 33

ABSTRACT

A study on the electrochemical machining of machining direction controllable electrode by external magnetic force

Shin, Seung-Sik

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

In this paper, we study the application of electrochemical machining (ECM) for the machining of internal features. The direction of the electrode tool can be controlled by using the magnetic force between the magnets. For this purpose, the change of the magnetic force according to the distance between the magnets was analyzed, and the optimum distance between the magnets was determined. The electrode tool with the magnet inserted therein is machined in the workpiece and is moved in the direction inducing the external magnetic force, so that it is possible to process the inner groove feature, which is very difficult in the conventional process. The purpose of this study is to identify the various possibilities of creating complex internal structures for workpieces such as molds by machining by ECM. This process is expected to be used effectively in various fields.

제 1 장 서 론

1-1 연구배경

최근 자동차, 항공 등 다양한 분야의 산업에서 초경합금, 공구강, 티타늄 합금과 같은 고강도 합금을 이용한 마이크로-나노 단위 부품 사용이 급격히 증가하고 있다. 티타늄 합금은 고강도이며, 열전도도가 낮고 보다 높은 화학적 반응성, 또 높은 절단온도와 고밀도의 성질을 가지고 있기 때문에, 티타늄 합금과 같은 고강도 재료들은 기존의 기계적 가공방법으로는 가공이 힘들고 특수가공 공정을 이용하여 효과적으로 가공하게 되었다. 특히 전기화학가공(ECM) 공정은 높은 출력에 의해 보다 효과적이면서 미세한 나노 특성과 정밀성으로 3차원의 복잡한 형상 가공의 대안을 제공해준다.

ECM(ElectroChemical Machining)은 1929년 최초로 사용되었고,¹⁾ 가공 공구인 전극과 공작물 간의 전기화학 반응을 통해 공작물의 일부가 용해되어 재료를 제거하는 공정이다. 전극(음극)과 공작물(양극) 사이에 0.3~0.7mm의 내부 전극 갭에 수십V 직류를 공급하고, 전해액(NaNO₃ 수용액)은 전극과 공작물 간극 사이를 30~70m/s 속도로 흐르고, 전류밀도는 수십~수백A/cm²를 유지한다. 재료 제거 속도는 패러데이 법칙에 의해 재료의 전기화학적 특성, 전해액 특성 및 공급 전류 및 전압에 의존하여 결정된다. ECM공정은 공구의 형상과 반대 형상대로 가공물을 형성하게 된다. ECM 가공법은 기종래의 가공법인 회전밀링과 같은 기계가공에 비해 공구 마모가 없고, 재료 경도의 영향을 받지 않으며, 비교적 높은 재료제거율(Material Removal Rate, MRR), 응력과 균열없이 원하는 복잡한 형상으로 제품을 가공할 수 있는 장점을 가지고 있다.²⁾ 그러므로 ECM은 터빈 블레이드, 엔진 주조, 베어링 케이싱, 기어, 다이스와 금형, 외과용 임플란트 등 많은 산업분야에 적용된다.^{3,4)} 하지만 ECM은 전해액의 균일한 유동장 형성의 어려움과 전극제작의 복잡성 그리고 방전가공 등에 비해 낮은 가공 정밀도의 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 전극공구 표면에 수많은 미세 구멍을 생성시켜 전해액이 균일하게 흘러나오게 하는 방법과⁵⁾ 3D 프린터를 이용한 손쉬운 전극 제작 방법⁶⁾ 그리고 직류 대신 Pulse를 인가하여 가공안정성을 높여 정밀도를 확보하는 방법 등 전기화학가공의 효율을 높이기 위한 여러 가지 연구가 진행되고 있다.⁷⁻¹²⁾ 전기

화학가공의 최대 단점은 전극 공구의 가공 진행 방향에 한계가 있다는 점이다. 전극 공구의 이송을 위해 전기화학가공 장치는 반드시 전극이송기구가 장착되어 있어야 한다. 따라서 전기화학가공을 이용한 소재 내부 곡선 가공은 어려움이 있다. 이러한 어려움을 해소하고자 전극이송기구가 필요 없는 자기력을 이용하여 전극 공구의 위치를 자유롭게 제어할 수 있는 공정을 개발하고자 한다.

1-2 연구내용 및 방법

소재 내부 곡선 형상을 가공하기 위해서는 Fig. 1과 같이 상형과 하형을 각각 기계 가공한 후 서로 결합하는 가공방법이 사용되고 있다. 이렇게 제작된 제품은 외부의 충격 및 노후화에 의해 피로가 누적되어 균열이 발생되고 결국 파손된다. 이러한 단점을 해결하기 위해 전기화학가공을 이용하여 소재의 내부를 가공하도록 하였다. 전기화학가공에 자석의 성질인 흡인력과 척력을 적용하여 전극공구의 위치를 제어하는 새로운 공정을 연구하였다. 전극공구의 내부에 자석을 삽입하고 외부에 자석을 배치하여 전극공구의 방향을 유도할 수 있도록 하였다. 이 공정은 종전의 가공법보다 비용과 시간을 절감할 수 있다는 장점도 있다. 자기력을 이용한 가공법은 지속적으로 연구되고 있다. Yamaguchi' s group이 자기력을 이용한 파이프 내부를 연마하는 가공법을 연구하여 자기력을 가공법에 적용할 수 있는 충분한 가능성을 확인할 수 있었다¹³⁾. 따라서 본 연구에서는 전기화학가공 시 전극이송장치가 아닌 전극공구가 외부자기력에 의해 스스로 전진하며 가공이 이루어지는 가공법 연구에 대하여 서술하며, 자석 간 거리에 따른 자기력의 변화를 분석하여 자기력을 이용한 전기화학가공이 이루어지기 위한 가공 메카니즘과 가공특성을 제시하고자 한다.

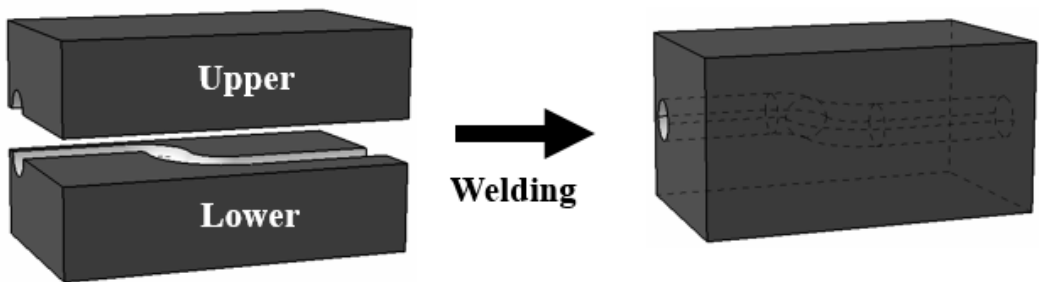


Fig. 1 Conventional process of internal machining

제 2 장 이론적 배경

2-1 전기화학가공(Electrochemical machining, ECM)

전기화학가공은 금속 재료의 전기화학 반응을 이용한 가공으로서, 금속의 경도나 강도 등 기계적 성질에 무관하게 가공이 가능하고 가공물에 잔류응력, Burr, 열 변형 등이 발생하지 않아 가공 표면의 품질이 우수하고 미세 형상의 정밀가공에 적합하다. 화학적인 반응을 이용하여 재료를 제거하는 화학가공(Chemical Machining)과 전기화학가공(Electrochemical Machining)의 차이점은 전기화학가공에서는 전류나 전압을 직류 또는 펄스 단위로 인가한다는 것이다. 정밀 전기화학가공에서는 전류를 조절하여 양극간의 화학 반응을 제어함으로써 가공의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 하지만 가공 영역 전반에 균일한 전류밀도가 유지되도록 설정해야 하고, 전극의 형상과 간극의 조건에도 영향을 바기 때문에 이를 고려하여 장비를 제작해야 한다.

가. 전기화학가공 원리 및 장치 구성

전기화학가공은 국부적으로 전기화학 반응을 일으켜 양극이 연결되어 있는 가공물의 이온이 전해액으로 용해(Anodic Dissolution)되는 현상을 이용하는 공법이다. 일반적으로 양극성의 가공물과 음극성의 공구가 전해액에 담가진 상태에서 전류를 인가하면 공작물의 표면과 전해액 사이에서 화학반응이 일어난다. 이 때 전해액은 양극 용해가 효과적으로 일어날 수 있는 수용액이 주로 사용되며 대표적으로 질산나트륨(NaNO_3), 염화나트륨(NaCl) 수용액이 사용되지만, 가공물 종류에 따라서 불산(HF), 염산(HCl), 황산(H_2SO_4)용액 등이 사용될 수 있다. 전해액의 농도에 따라 가공 속도가 달라지므로 가공 목적에 따라 전해액의 농도를 다르게 설정해야 한다. 농도가 높을수록 가공속도는 증가하지만 가공정밀도는 떨어지게 된다. 미세 가공에서는 전해액의 순환 및 유동장도 중요하며 전기화학 반응이 일어날 때 발생하는 기포가 가공 방해 요소로 작용할 수 있기 때문에 기포를 최소화 하는 조건에서 가공이 이루어져야 원하는 정밀도를 갖는 제품을 얻을 수 있다. 공구와 가

공물에 인가하는 전압 또는 전류의 세기에 따라 가공물의 용해 속도를 제어할 수 있으며 전압 또는 전류의 세기가 높을수록 반응 속도가 빨라지게 된다. 반응이 빨라지는 반면에 가공 정밀도는 떨어지므로 적절한 조건 설정이 필요하다. 마이크로-나노 형상의 초정밀 가공에서는 수 ns에서 수십 ns 폭의 펄스전압을 인가하여 가공 정밀도를 높이는 방법을 사용하기도 한다. 음극과 연결된 전극 공구에서는 환원반응이 일어나며 수소기체가 발생하고 양극과 연결된 공작물에서는 용출 현상 발생하여 음극인 전극 공구는 이론적으로 마모가 발생되지 않는다. 전극 공구 재료에 적합한 조건은 화학적 안정성이 높은 금속재료가 유리하며, 마이크로-나노 가공에서는 텅스텐, 백금, 초경합금, 스테인리스 강 등이 공구 재료로 많이 쓰인다. 백금은 화학적으로 안정적인 성질을 가지고 있으며 수십 마이크로의 지름을 가지는 와이어 형태로 얻을 수 있기 때문에 10 μm 정도의 미세 홀 등의 형상 가공에 유리하다. 텅스텐도 수 마이크로미터의 와이어나 핀 형태로 사용된다. 미세 가공에 사용되는 미세 공구는 공구의 강성을 필요로 하며 그런 이유로 텅스텐, 초경합금, 스테인리스강이 미세 전해 가공의 공구재료로 이용된다. 이들 공구는 많은 경우 와이어 방전가공, 전해에칭 방법으로 제작된다. Fig. 2는 전기화학가공 시스템의 개략도이다. 전기화학가공 장치의 기본 구성은 전극 공구, 가공물, 전해액, 전원 공급 장치이다. 전원 공급 장치로부터 직류 또는 펄스 전압이 공급되며, 양극은 공작물에, 음극은 공구에 연결된다. 전해액에 공구와 공작물을 담근 상태로 가공하거나 가공이 진행되는 영역에 전해액을 분사시키는 방식이 사용되며 가공물 재료에 따라 적합한 전해액을 사용한다. 공구 형상과 이송 방법에 따라 전해 밀링, 드릴링, 와이어 전기화학가공 등으로 나눌 수 있다.

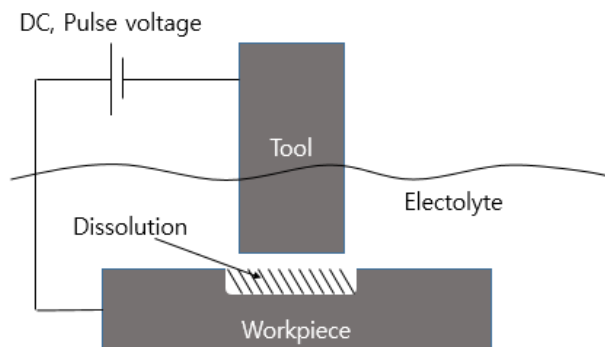


Fig. 2 Schematic diagram of ECM system

또한 전기 화학가공은 패러데이의 법칙(Faraday`s law)에 의해 금속 제거량을 정의할 수 있다.

$$m = \frac{AIt}{zF} \quad (2.1)$$

A : Atomic weight

I : Current

t : Machining time

z : Valency

F : Faraday`s constant

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

하지만 패러데이법칙 이론상의 금속 제거율은 실제 가공 시 설정하는 전류밀도, 전압, 가공 시간 등에 따라 실제 금속 제거율과 차이를 보이며, 가공 후 측정을 통해 이론적 수치와 실제 실험 결과의 비교가 필요하다. 이러한 전기화학가공이 계속적인 연구를 통해 많은 발전을 이루었으며, 그 결과 중 하나로 가공 정밀도를 향상시키는 Micro-ECM이 개발되었으며,¹⁴⁾ 보다 미세한 정밀도를 제어할 목적으로 Pulse를 인가하여 ECM을 진행한다.^{10,11)} 연속적인 전류가 흐르는 직류는 전극 공구에 지속적으로 열이 발생되지만 Pulse 전류가 인가되면 Off-time의 경우 반응이 일어나지 않아 주입되는 전해액으로 인해 금속이온, 열, 버블 등이 빠져나가게 되어 보다 안정적인 전기화학가공이 이루어지게 한다.

2-2 자기력 계산

두 자석 사이의 거리 변화 따라 자석 간 작용하는 인력과 척력은 변화하게 된다. 두 자석의 인력과 척력을 계산하는 것은 일반적으로 자석의 모양, 자화 및 방향에 따라 매우 복잡하다. 이러한 계산은 Gilbert Model에 따라 계산이 가능하다.

가. 두 자극 사이의 힘

두 극점이 모두 점으로 표시될 만큼 작으면 점 전자기장으로 구분할 수 있다. 이러한 경우 두 극점 사이의 힘은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F = \frac{\mu q_{m1} q_{m2}}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

여기서,

F : 힘

q_{m1} : 자극1의 크기

q_{m2} : 자극2의 크기

μ : 중간 매질의 침투성

r : 자극 간 거리

나. 영역A의 두 개의 자화 표면 사이의 힘

두 개의 가까운 자화 표면 사이의 기계적 힘은 다음 방정식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$F = \frac{\mu_0 H^2 A}{2} = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (2.3)$$

여기서,

A : 각 면의 면적

H : 자화 전계(A/m)

μ_0 : 공간의 투자율

B : 자속밀도

다. 두 개의 원통형 자석 사이의 힘

두 개의 원통형 자석 사이의 힘은 다음 방정식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$F(x) = \frac{3\pi\mu_0}{2} M^2 R^4 L^2 \frac{1}{x^4} = \frac{3\mu_0}{2\pi} M^2 V^2 L^2 \frac{1}{x^4} \quad (2.4)$$

여기서,

M : 자석의 자화

x : 자석 간 거리

R : 자석의 직경

L : 자석의 길이

V : 자석의 부피

위와 같이 자석의 형상과 조건에 따라 자기력을 계산하는 방정식이 다르게 적용된다. 본 연구에서는 두 개의 원통형 자석 사이의 자기력을 이용하여 실험을 진행하였기 때문에 다항의 조건을 적용하여 자기력을 분석하였다.

제 3 장 실험 장치 제작

3-1. 자기력 분석

외부 자기력에 의해 자석이 삽입된 전극 공구의 가공 방향성이 유도되기 때문에 외부자석과 전극공구자석의 자기력 분석은 매우 중요하다. 두 자석간의 인력이 발생하는 최적의 거리를 확인한 후 전기화학가공 장치의 전체적인 크기를 결정하여야 가공이 효율적으로 이루어진다. 자기력 측정은 외부 자석과 전극 공구에 삽입된 자석의 자기력을 각각 거리에 따라 측정하였고, 두 자석 간에 발생하는 인력을 Gilbert model 방정식을 이용해 분석한 값과 실험을 통해 확인한 결과를 모두 고려하여 최적의 거리를 결정하였다.

첫 번째로, 외부자석과 전극공구 자석의 자기력을 각각 측정하였다. 측정 방법은 Fig. 3과 같이 측정 장비를 제작하여, 가우스 측정기(MG-3002, LUTRON)와 자석을 접촉시킨 상태에서 2mm간격으로 최대 30mm까지 자석을 이동시켜 자기력을 측정하였다. Fig. 4는 거리에 따른 자기력 변화를 그래프로 나타내었다. Table. 1은 거리에 따른 자기력을 수치로 나타내었으며, 잔존하는 자기력을 계산하여 거리에 따른 자기력 변화율을 나타내었다. 자석의 거리가 2mm 멀어질수록 약 79%의 자기력이 잔존하는 것을 확인할 수 있다.

두 번째로는 Gilbert model 방정식과 실제 실험 결과를 고려하여 두 자석간의 위치제어를 위한 최적의 자기력을 분석하였다. 본 실험에서는 자석의 특성을 이용하여 보다 정교한 위치 제어를 위해 총 2개의 외부 자석을 설치하였다. 제1의 외부자석은 전극 공구의 진행 방향에서 흡인력으로 당겨주고, 제2의 외부 자석은 반대편에서 척력으로 밀어주도록 하였다. Fig. 5는 위에서 설명한 자석의 배치를 나타낸다. 먼저 두 자석간의 움직임이 발생하는 최소 자기력을 측정하기 위하여 다음과 같이 자기력을 측정하였다. 자석이 삽입된 전극 공구를 물이 담긴 사각 수조 중앙에 침지시키고 외부 자석은 수조 벽면으로부터 8cm 떨어진 외부에 위치시켰다. 그 후 외부자석을 1cm 간격으로 수조 쪽으로 이동시켜 자석이 삽입된 전극 공구의 움직임을 관찰하여 전극 공구가 외부 자석을 향해 움직임을 보이는 시점을 확인 하였다. Fig. 6은 위의 측정 방법을 나타낸다. 두 자석의 간격이 14cm인 지점부터 미세한 움직임이 발생하였고 11cm 지점에서 강한 인력이 발생함을 확인할

수 있었다. Fig. 7은 제 1 외부자석 인력과 제 2 외부자석 척력의 거리에 따른 계산 값을 보여준다. 자극 간격이 2cm 지점까지 자기력이 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7에 나타낸 인력과 척력의 합력을 나타낸 그래프이다. 외부자석을 1개를 사용하여 인력만 존재한 조건에 비해 척력의 힘이 더해져 자기력이 향상되었음을 확인할 수 있다. 10cm 지점에서는 약 0.001N의 자기력이 향상되었다. Fig. 9는 외부자석 자기력 세기가 다른 3가지 조건의 자기력 변화를 보여준다. 위의 실험을 통해 두 자석간의 거리가 최소 11cm의 조건이 되어야 외부자기력에 의해 자기전극의 방향제어가 가능함을 확인하였다. 11cm 거리값을 Gilbert 방정식에 대입하면, 자기전극을 움직이기 위해서는 최소 약0.0006N의 자기력이 필요하다는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 보면 외부자석의 자기력이 1000G일 경우 극간의 거리가 7cm 지점부터 전극의 제어가 불가능하고 3000G의 경우 최소 자기력의 조건은 만족하지만 10cm 지점 부근에서 최소 자기력의 값과 거의 유사한 값을 갖게 되어 강력한 제어를 보장하기 힘들다. 본 연구에서 사용한 5000G의 외부 자석은 최소 자기력이 약 0.0018N으로 전극 제어에 필요한 최소 자기력보다 3배이므로 본 연구 조건에 적합함을 확인할 수 있다. 이러한 자기력 분석 결과 값을 토대로 0.002N 이상의 자기력으로 자기전극의 방향 제어를 위해 18cm의 범위에서 가공이 이루어 질 수 있도록 장치사이즈를 결정하였다.

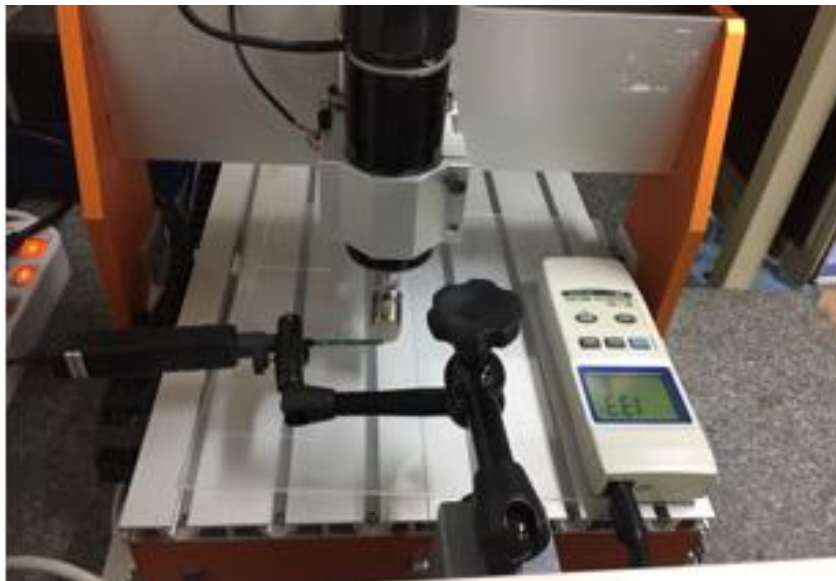


Fig. 3 Equipment of magnetic force measurement

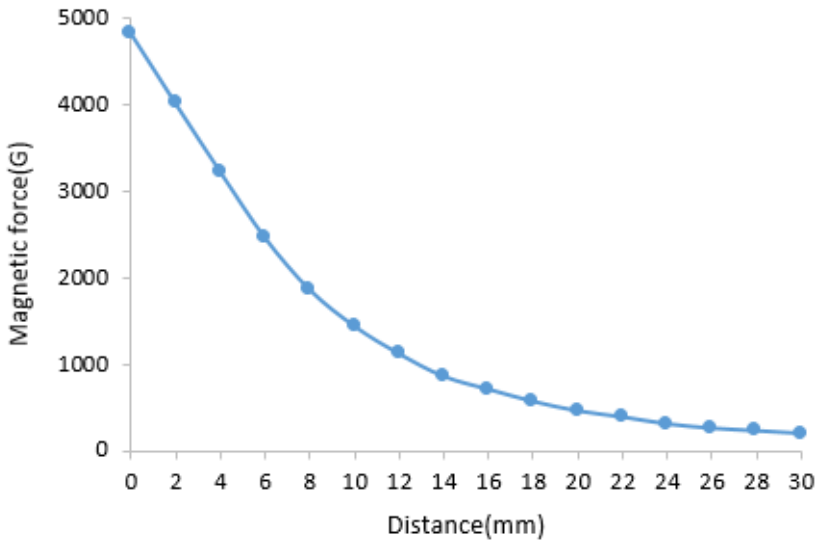


Fig. 4 Relationship between distance and magnetic force

Table. 1 Relationship between distance and magnetic force

Distance (mm)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Remianing magnetic force	G	4820	4010	3220	2460	1860	1440	1120	860	710	460
	%	100	83	67	51	39	30	23	18	15	10
	%		83	80	76	76	77	78	77	83	80

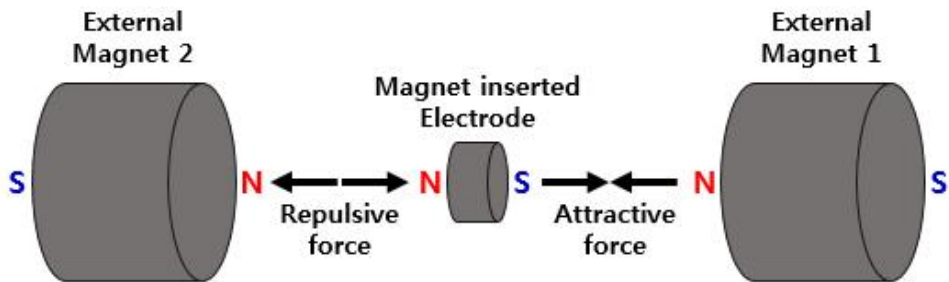


Fig. 5 Principle of electrode movement

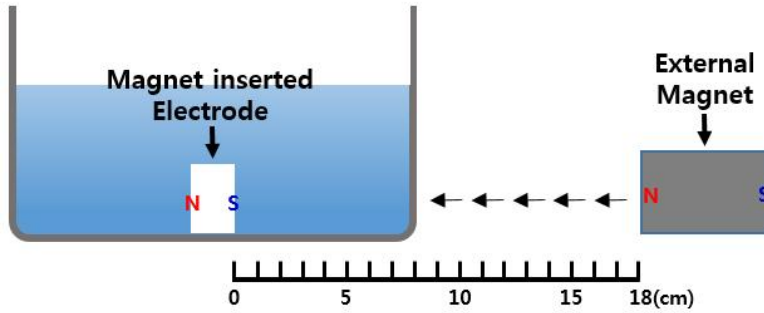


Fig.6 Measurement of minimum magnetic force to move electrode

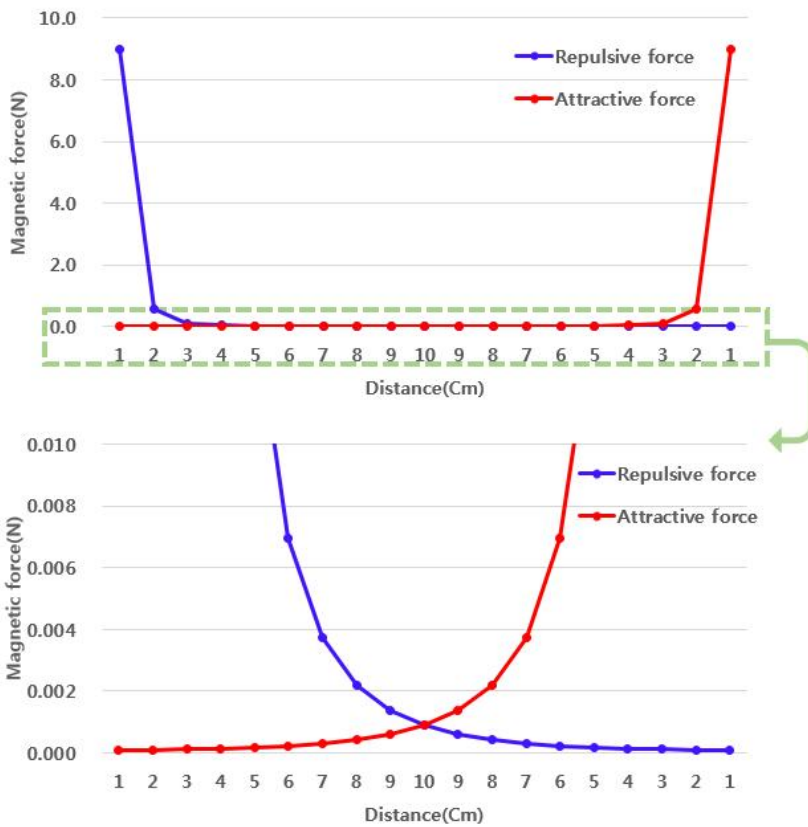


Fig. 7 Repulsive force and attractive force between a magnetic electrode and external magnets according to distance using Gilbert model

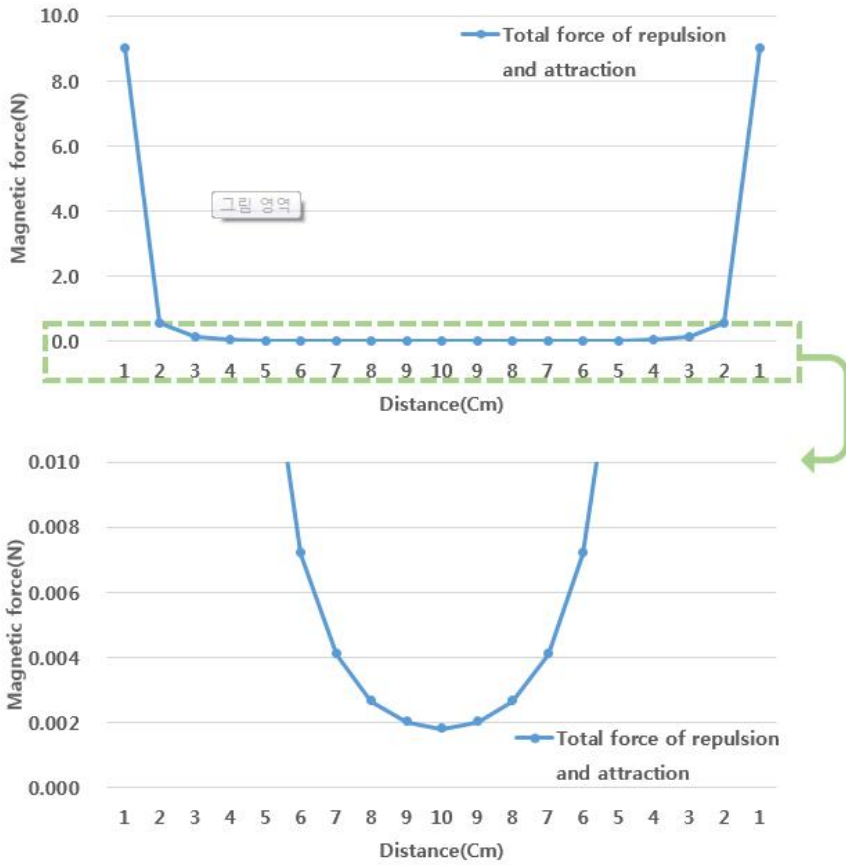


Fig. 8 Total force of repulsive force and attractive force between a magnetic electrode and external magnets according to distance

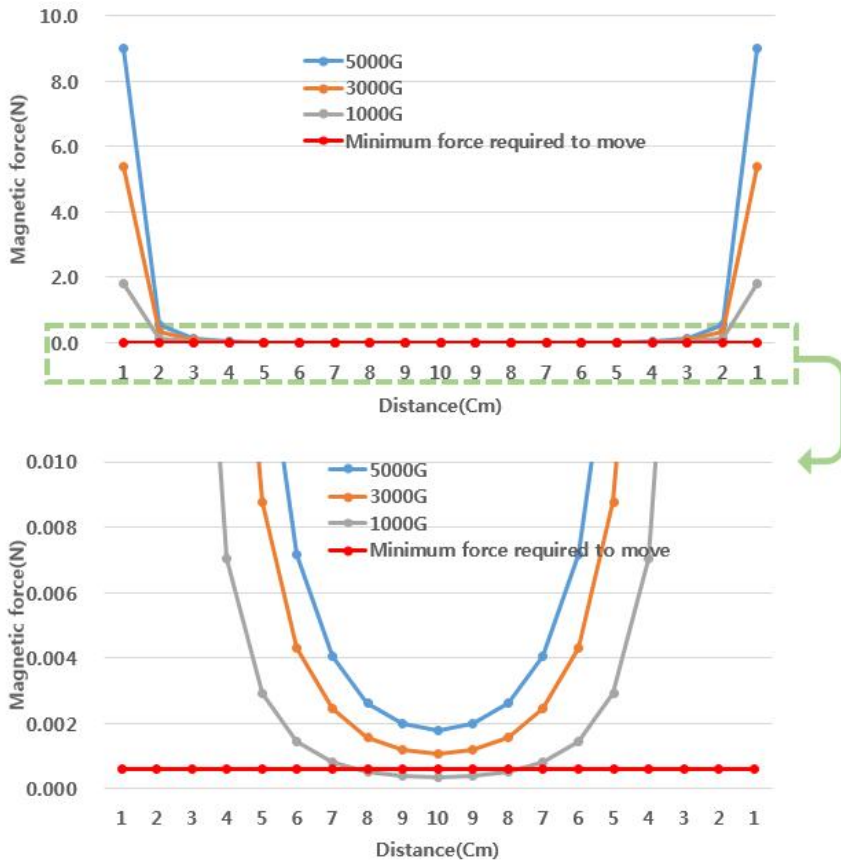


Fig. 9 Total force of repulsive force and attractive force between a magnet inserted electrode and 3 conditions of external magnets according to distance

3-2. 실험 장치 제작

자기력 분석 결과 값을 바탕으로 장치의 크기가 결정되었고 그에 따라 제작된 실험 장치의 구성도는 Fig. 10에 나타내었다. 본 연구의 전기화학가공의 전해액은 부식성분이 있는 NaNO_3 용액을 사용하기 때문에 Anodizing 처리가 된 알루미늄 프로파일을 사용하여 외부자석 홀더의 중심축을 지탱할 수 있는 프레임을 구성하고, 프레임 상단의 중심에 스텝모터를 부착하여 중심축의 역할을 하도록 하였다. 스텝모터는 Mechasolution 社의 JOH-YMJ-00020를 사용하여 약 0.1° 단위로 회전각을 설정할 수 있어 정교한 제어가 가능하다. 스텝모터의 회전축에 외부 자석 홀더를 결합하여 가공수조와 5mm 간격을 유지하며 360° 회전이 가능해 전극의 가공방향을 효과적으로 유도할 수 있다. 외부 자석 홀더는 초기에 3D 프린터를 이용하여 ABS소재로 출력하였으나 강도의 문제로 알루미늄 프로파일로 변경하여 제작하였다. 가공이 이루어지는 수조는 외부 자석과의 간격을 최소화시키기 위하여 아크릴 원통을 선정하였고, 가공이 진행되는 과정을 육안으로 관찰할 수 있도록 하였다. Fig. 11는 실제 가공이 이루어지는 수조의 모습을 나타낸다. Fig. 12는 본 연구를 위해 제작된 전기화학가공 실험 장치이다.

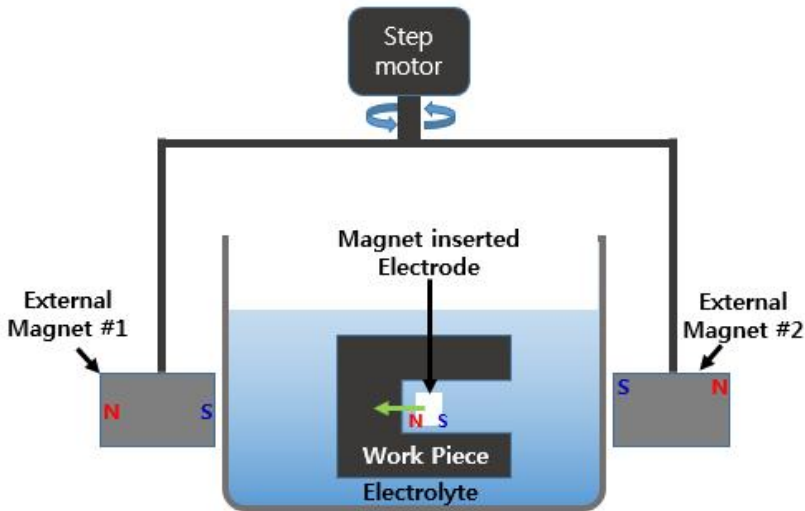


Fig. 10 Schematic diagram of ECM

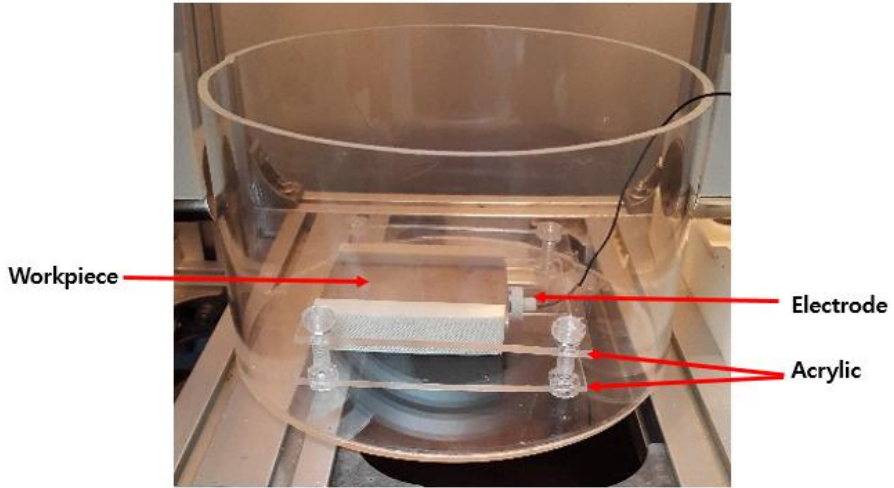


Fig. 11 Workpiece and electrode tool

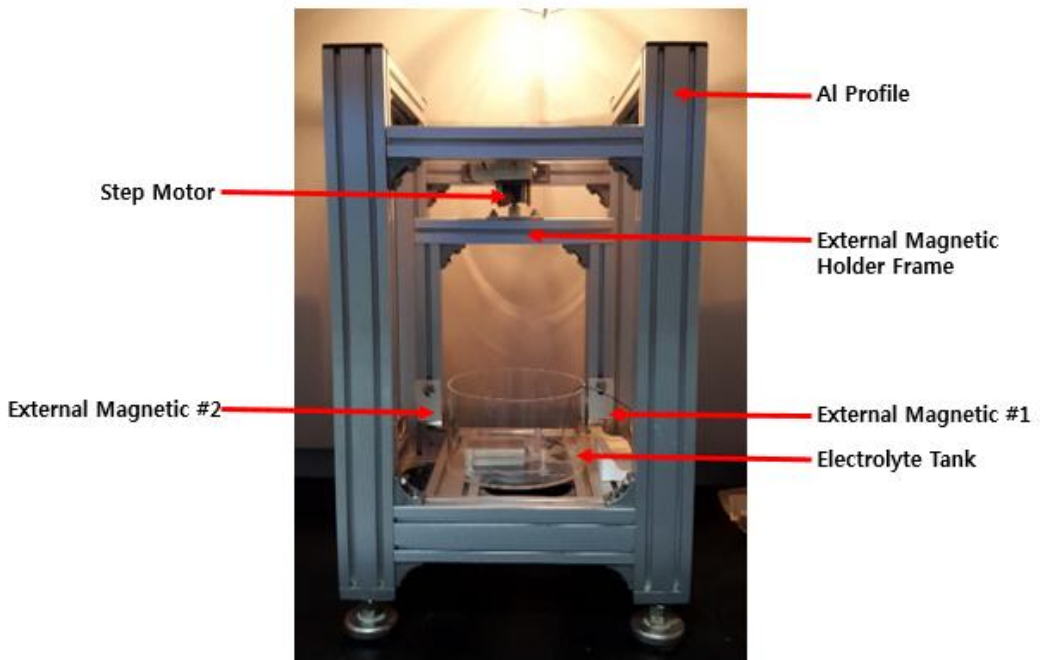


Fig. 12 Equipment of ECM stage

제 4 장 실험 내용 및 결과

4-1. 원통형 전극 공구

가. 원통형 전극 공구 제작

외부 자기력에 의해 위치 제어가 가능한 전극 공구는 Fig. 13의 공정을 통해 제작 된다. Fig. 13 (a)와 같이 3D 프린터를 사용하여 ABS 소재의 전극 몸체를 출력하고 Fig. 13 (b)는 자석의 표면에 Silver Paste 코팅 공정을 보여준다. Silver Paste를 코팅은 네이디뮴 자석이 열에 약한 특성이 있기 때문에 가공 중 발생하는 열로 인해 자석이 손상되는 것을 방지하고 가공의 효율을 높이기 위해 저항을 감소시키기 위함이다. 코팅제는 Aerosol 타입의 Silver Coated Copper와 Brush 타입의 Silver Paste를 사용하여 각각 4회씩 코팅하였다. Fig. 13 (c)와 같이 전극 몸체에 코팅된 자석을 삽입시켜 가공이 이루어지는 자석의 앞면을 제외한 뒷면과 측면은 ABS소재의 전극몸체로 인해 절연상태가 된다. 효과적인 절연효과를 위해 3D 프린트에서 출력한 전극몸체는 아세톤 증기 마감처리를 실시하였다. Fig. 14는 아세톤 증기 마감 처리 한 전극 몸체와 하지 않은 전극 몸체를 비교한 사진이다. 우측의 전극 몸체의 조직이 더욱 견고하게 결합되어 매끈한 표면을 갖게 되었다. Fig. 15는 원통형 전극 공구의 모형을 나타낸다. 전기화학가공은 가공 중 열과 슬러리와 같은 불순물이 발생하여 가공의 효율을 감소시키게 된다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 전극 내부에서 전해액이 흘러나와 공작물과 전극공구 사이의 열과 불순물을 배출시킬 수 있도록 전극의 후면에 전해액 공급 노즐을 연결하였다. 공작물과 전극 공구 간의 일정한 거리를 유지하기 위해 전극 몸체 앞면의 4곳에 1mm의 높이의 돌출부를 만들어 가공 정밀도를 향상시킬 수 있도록 하였다. 안정적인 가공을 위한 간극 유지는 위의 돌출부에 의해서 이루어지며 자기력의 세기는 가공 방향 제어에만 영향을 미칠 뿐 가공성에는 아무런 영향을 미치지 않는다. Fig. 16은 완성된 전극 공구의 사진을 보여준다.

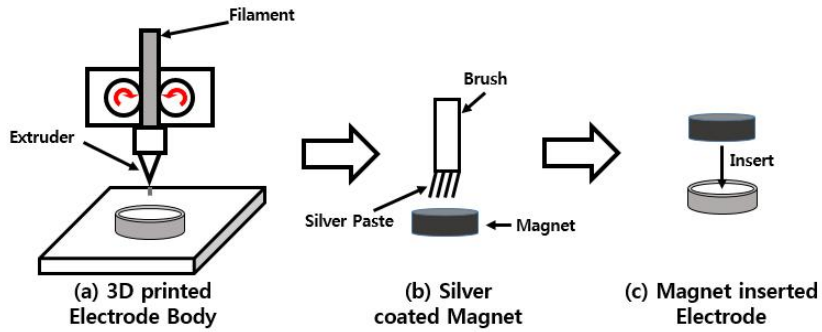


Fig. 13 Process of Cylindrical Electrode fabrication

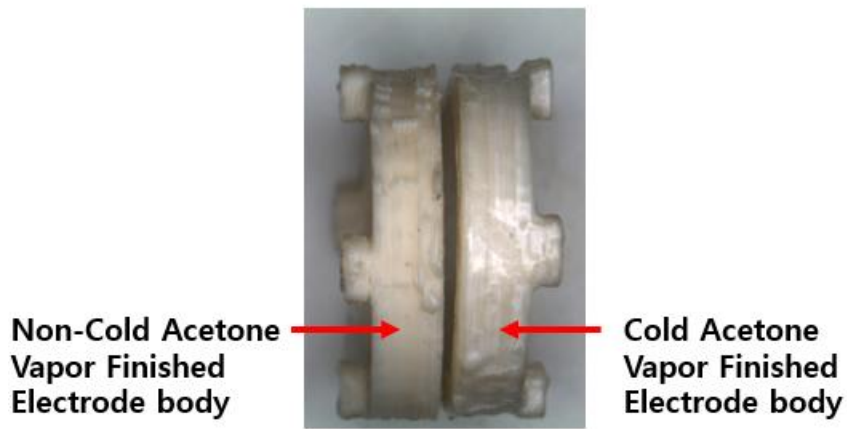


Fig. 14 Comparison of non-cold acetone vapor finished electrode body and cold acetone vapor finished electrode body

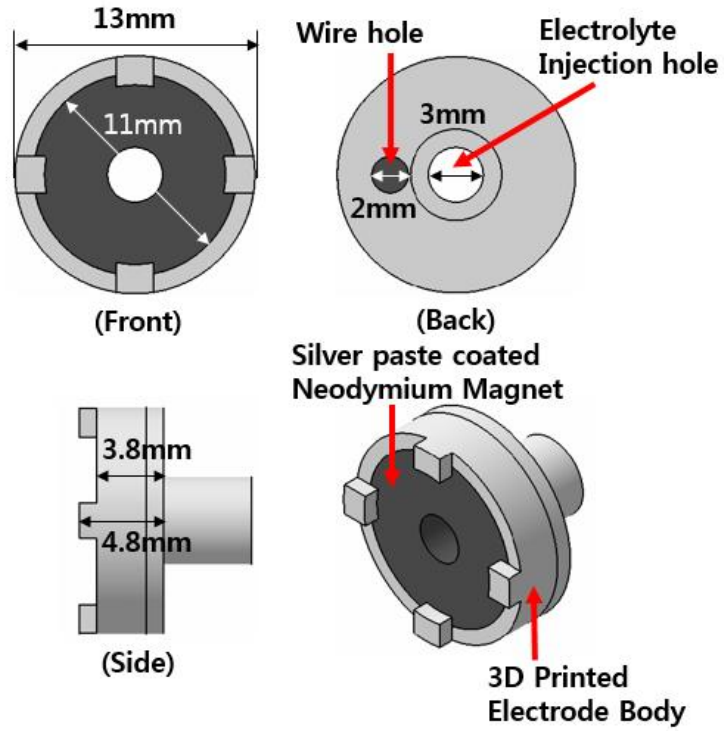


Fig. 15 Shape of Cylindrical electrode tool



Fig. 16 Cylindrical electrode tool

나. 원통형 전극 공구를 이용한 실험 방법

본 실험에서는 3가지 시편을 사용하여 실험을 진행하였다. STS304 Mesh 소재, STS304 5T 그리고 STS304 0.3T 2장의 시편을 사용하였다. Mesh와 5T 시편은 전해액의 균일한 유동장 형성이 가공에 미치는 영향을 분석하기 위함이고, 0.3T 2겹의 시편은 외부자기력에 의한 자기전극의 방향제어의 가능성을 확인하기 위해서이다. Mesh 소재의 경우, 전극공구에서 흘러나온 전해액이 Mesh 틈 사이로 빠져나가 균일한 흐름을 유지하지 못하는 반면, 5mm 두께의 시편은 전해액이 일정한 흐름을 유지할 것이라고 예상하였다. 또한 전극공구에 Aerosol 타입의 Silver Coated Copper(SSC)와 Brush 타입의 Silver Paste 2가지의 코팅을 각각 실시하여 가공 후 전극 공구 상태를 확인해 보기로 하였다.

(1) STS304 Mesh 시편

실험 전 STS304 Mesh 소재 표면의 불순물 제거를 위해 아세톤에 침지하여 1분간 초음파 세척을 실시하였다. 외부자석은 1개만 사용하여 자기 자석과 인력만으로 가공이 진행되도록 하였다. 장치 개략도를 Fig. 17에 나타내었다. 20wt%의 NaNO_3 의 전해액을 사용하였으며, 침지 상태에서 전극의 노즐을 통해 전해액이 직접 분사되는 조건으로 가공이 진행된다. 전해액의 온도유지를 위해 Thermoregulator를 30°C 로 설정하였다. 0.54T의 STS304 Mesh를 구부려 12겹을 만든 후 침지시켜 가공하였다. 전해액의 슬러리 제거를 위해 전해액이 펌프와 필터를 통과하여 정제 및 순환 되도록 하여 보다 안정적인 가공이 진행되도록 하였다. 외부자석은 5000G, 전극에 삽입된 자석은 2000G의 자기력을 갖는 네오디뮴자석을 사용하였다. 1.4 A/cm^2 의 전류밀도로 1시간 동안 펄스전류를 인가하여 가공을 진행하였다. 전극에서 분사되는 전해액의 유속은 $1.13 \times 10^4 \text{ mm/min}$ 로 유지시켜주었다. 각 상세 가공조건은 Table. 2에 나타내었다. 본 실험의 목적은 전해액의 균일한 유동장이 가공성에 미치는 영향을 분석하는 것이므로 외부 자석은 이동하지 않고 1축 가공만 진행하였다. Aerosol 타입의 SSC 코팅 전극으로 가공을 실시하였다.

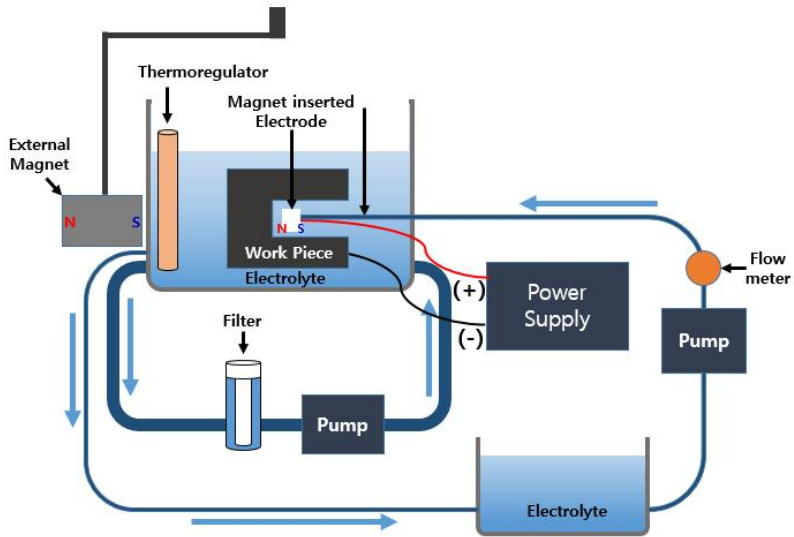


Fig. 17 Schematic of 1-axis ECM process using cylindrical electrode

Table. 2 Experimental conditions of ECM process using cylindrical electrode tool on STS304 Mesh

Inserted magnetic force	2000 G
External magnetic force	5000 G
Current density	1.4 A/cm ²
Machining time	1 hour
Duty factor	50 %
Electrolyte	20 wt% NaNO ₃
Electrolyte Temp	30 °C
Velocity of flow	1.13 × 10 ⁴ mm/min
Flow rate	32 × 10 ⁴ mm ³ /min
Workpiece	STS304 Mesh

(2) STS304 5T 시편

실험 전 초음파 세척을 동일하게 실시하였다. 본 실험은 침지 상태에서 전극의 노즐을 통해 전해액이 직접 분사되는 조건으로 가공이 진행된다. 전극 노즐에서 정제된 전해액이 공급된다 하더라도 침지용 전해액에는 가공 중 발생하는 많은 양의 슬러리가 존재하게 되고 이것은 가공에 악영향을 미치게 된다. 따라서 침지용 전해액은 별도의 펌프를 사용하여 필터를 거쳐 정제된 전해액을 순환시킬 수 있는 전해액 정제 장비를 추가하여 보다 안정적인 가공이 진행될 수 있게 하였다. 또한 전해액의 온도를 30℃로 유지시켜주기 위하여 Thermoregulator를 설치하였다. 전류 밀도는 1.6 A/cm², 3.2 A/cm² 그리고 4.2 A/cm² 세 가지 조건으로 진행하였으며, 전류밀도 4.2 A/cm² 의 경우 가공 시간에 변화를 주어 2번의 실험을 실시하였다. Table. 3는 본 실험의 상세 조건을 나타내었다. 또한 2가지 타입의 코팅 전극으로 각각 실험을 진행하였다. 본 실험은 Mesh 소재와 비교하여 전해액의 균일한 유동장 형성이 가공에 미치는 영향을 분석하기 위한 목적이므로 외부자석의 위치이동 없이 1축 가공만 실시하였다.

Table. 3 Experimental conditions of ECM process using cylindrical electrode tool on STS304 5T

Inserted magnetic force	2000 G
External magnetic force	5000 G
Current density & Machining time	1.6 A/cm ² , 1hour
	3.2 A/cm ² , 1hour
	4.2 A/cm ² , 1hour
	4.2 A/cm ² , 4hour
Duty factor	50 %
Electrolyte	20 wt% NaNO ₃
Electrolyte Temp	30 °C
Velocity of flow	1.13 × 10 ⁴ mm/min
Flow rate	32 × 10 ⁴ mm ³ /min
Workpiece	STS304 5T

(3) STS304 0.3T 2장 시편

위 두 실험과 동일하게 시편에 초음파 세척을 실시하여 이물질을 제거하였다. 본 실험은 방향 제어의 가능성을 확인하기 위해 외부자석으로 2개의 네오디뮴 자석을 사용하여 진행하였다. 실험의 개략도를 Fig. 18에 나타내었다. 실험 조건은 20wt% NaNO_3 의 전해액에 침지시킨 상태에서 실험을 진행하였으며 안정적인 가공을 위해 Thermoregulator를 사용하였다. 30°C 를 유지시켜주었다. 전극은 네오디뮴 자석에 Silver Paste를 4회 코팅한 전해액 분사 기능이 없는 원통형 전극을 사용하였고, 가공영역과 근접한 위치에서 전해액을 별도로 분사하여 가공 중 발생하는 불순물과 열을 극간에서 배출시킬 수 있도록 하였다. 전해액 직접 분사 전극을 사용하지 않은 이유는 노즐의 연성이 충분하지 않아 전극의 방향 전환에 방해요인으로 작용할 것으로 예상되었기 때문이다. 오염된 전해액은 펌프를 이용해 필터를 거쳐 정제된 전해액을 다시 공급해 주었다. 전류밀도는 $2.1\text{A}/\text{cm}^2$, Duty factor 50%로 설정하여 인가하였다. 자세한 실험조건은 Table. 4에 나타내었다. 이전 실험에 사용되었던 STS304 5T 소재는 과도한 가공 시간으로 인해 STS304, 0.3T 2장을 사용하여 보다 짧은 시간에 가공성을 확인할 수 있도록 하였다. Fig. 19는 본 실험에서 사용한 소재를 보여준다. 실험은 11시간동안 진행 되었으며, 외부 자기력을 이동시켜 전극의 위치 변화를 확인하기 위해 최초 8시간은 외부 자석을 1시간 당 10° 의 각도로 시계방향으로 회전시켜 주었으며, 이후 3시간은 반시계방향으로 회전시켜 S형 곡선의 형상을 가공하도록 하였다.

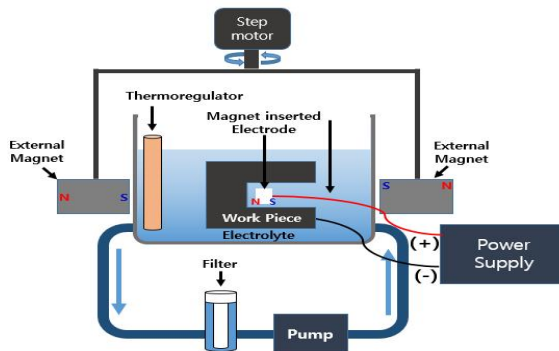


Fig. 18 Schematic of 2-axis ECM process using cylindrical electrode tool

Table. 4 Experimental conditions of ECM process using cylindrical electrode tool on STS304 0.3T double layers

Inserted magnetic force	2000 G
External magnetic force	5000 G
Current density	2.1 A/cm ²
Machining time	11 hour
Duty factor	50 %
Electrolyte	20 wt% NaNO ₃
Electrolyte Temp	30 °C
Workpiece	STS304 0.3T Double layer

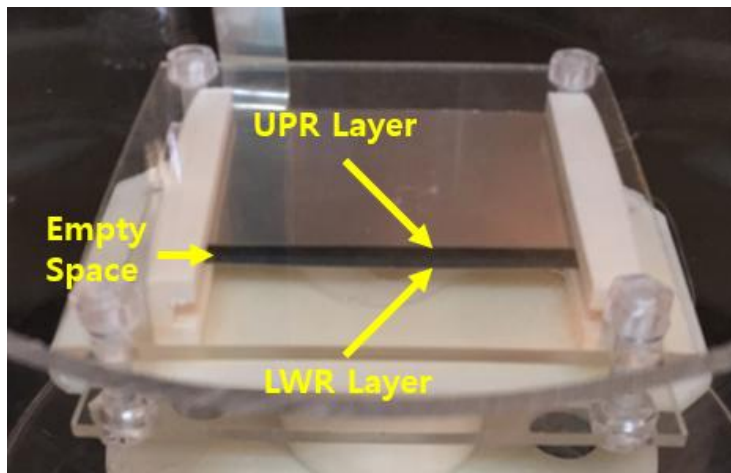


Fig. 19 STS304 0.3T double layers workpiece

다. 원통형 전극 공구를 이용한 실험 결과

(1) STS304 Mesh 시편 가공결과

본 실험의 목표인 시편의 관통은 성공하지 못하였다. 최종 가공 결과는 3장의 STS304 Mesh를 관통하고 4장 가공 중 가공을 중단하였다. Fig. 20는 가공 된 시편을 나타낸다. Fig. 20에서 볼 수 있듯이 시편 내부로 갈수록 가공 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다. 이는 전극이 시편 첫 번째 장의 가공 폭인 11mm 보다 전극 몸체 14mm의 크기가 크기 때문에 시편내부로 진입하지 못한 상태에서 2번째와 3번째 장의 가공이 진행 되었다고 볼 수 있다. 가공 범위가 점점 작아져 결국은 4번째 장에서 더 이상 가공이 진행 되지 않아 가공을 중단시키게 되었다. Table. 5는 각 Layer의 가공 폭을 나타낸다. 전극의 역할을 하는 네오디뮴 자석이 노출되는 지름은 10mm이고, 첫 번째 장의 가공 지름은 11mm 이다. 예상보다 가공 지름이 좁게 가공 되었는데, 이는 시편으로 사용 된 Mesh 소재 사이로 전해액이 흘러 나가 전해액의 균일한 유동장을 형성하지 못하여 이러한 결과가 나타났다고 판단하였다.

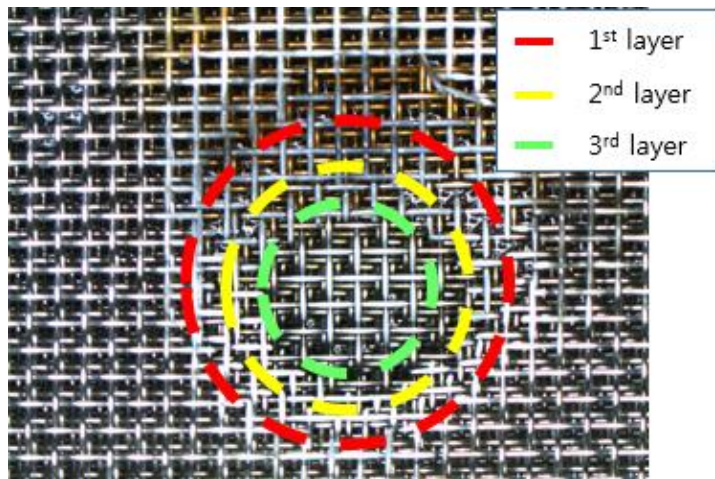


Fig. 20 Machined hole after ECM using cylindrical electrode tool on STS304 Mesh

Table. 5 Resort of ECM using cylindrical electrode tool on STS304
Mesh

Layer	Width
1st	11 mm
2nd	9 mm
3rd	6 mm

(2) STS304 5T 시편 가공결과

SCC 코팅에서 박리는 발생하지 않았지만 장시간 가공에 의해 전극의 침지시간이 길어짐으로써 SSC코팅은 불림현상이 발생하여 코팅입자가 분리되는 문제점이 발생하였다. 이에 반해 Silver Paste 코팅은 4시간의 장시간 가공 후에도 박리 및 불림 현상이 발생하지 않았기 때문에 본 실험의 코팅재료로는 Silver Paste가 적합하다고 판단되었다. 또한 Kim의 연구 결과에서 Sheet resistance, SEM측정, EDS 분석을 통하여 Silver Paste가 가장 적합한 코팅제임을 밝혔다.⁶⁾ Fig. 21은 가공 후 전극의 상태를 보여준다. Fig. 22는 각 조건으로 가공된 시편을 나타낸다. 1.6 A/cm²의 전류밀도로 가공된 (a)는 가공 중 전극의 움직임이 발생하여 가공 영역이 변경되었다. 직경 13.1 mm, 깊이 0.54 mm의 홀이 가공되었으며, 가공 속도는 0.14 μm/s이다. 전류밀도 3.2 A/cm²의 (b)는 직경 14.7 mm, 깊이 2.40 mm의 홀이 가공되었으며, 가공 속도는 0.67 μm/s이다. (c)는 4.2 A/cm²의 전류밀도로 1시간동안 가공을 실시하여 직경 16.1mm, 깊이 4.08mm로 가공되었고, 가공 속도는 0.78 μm/s이다. (d)는 4.2 A/cm²의 전류밀도로 4시간 동안 가공을 진행하였다. 직경 17.86mm로 5T소재의 관통이 이루어졌다. 약 3시간째부터 시편에 구멍이 발생하기 시작하였으며, 전극이 완전히 관통이 이루어질 때까지 가공을 진행하려 하였으나, 3시간 이후부터 가공속도가 현저히 느려져 4시간 경과 후 가공을 중단하였다. 시편의 구멍을 통해 전해액이 흘러가나 균일한 유동장이 형성되지 않아 가공속도에 영향을 미친 것으로 판단된다. Table. 6은 각 조건에 대한 가공 결과를 나타낸다.

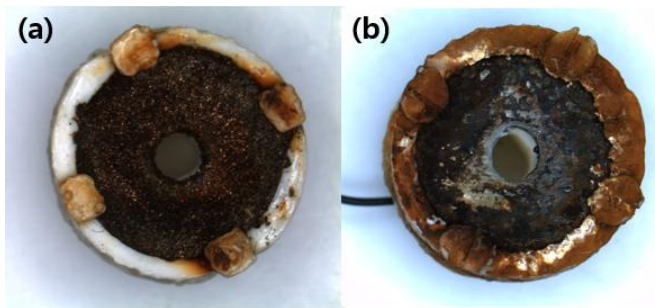


Fig. 21 (a) SCC coated Cylindrical electrode tool condition and (b) Silver paste coated Cylindrical electrode tool condition after machining

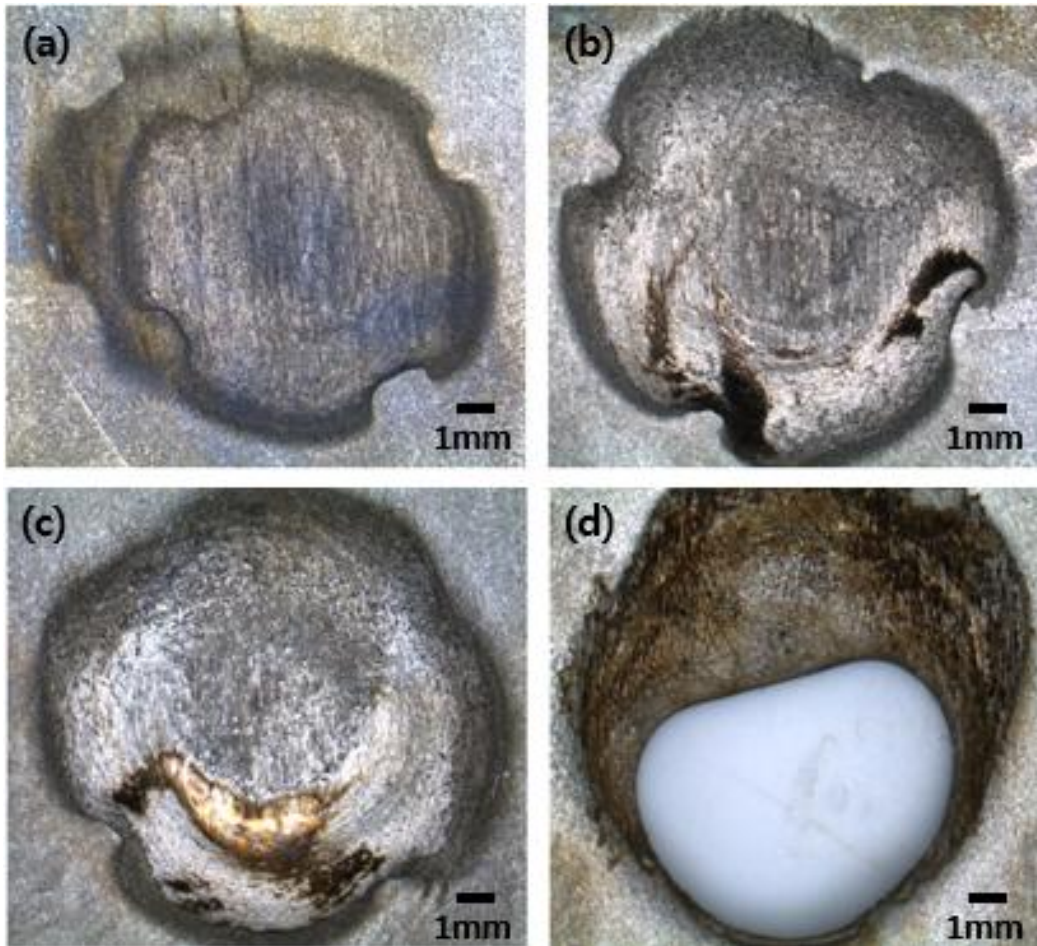


Fig. 22 Machined hole with (a) 1.6 A/cm^2 , 1hour, (b) 3.2 A/cm^2 , 1hour, (c) 4.2 A/cm^2 , 1hour and (d) 4.2 A/cm^2 , 4hour using cylindrical electrode tool on STS304 5T

Table. 6 Result of ECM using cylindrical electrode tool on STS304 5T

Condition	Width	Depth	Feed rate
1.6 A/cm^2 , 1hour	13.1 mm	0.54 mm	$0.14 \mu\text{m/s}$
3.2 A/cm^2 , 1hour	14.7 mm	2.40 mm	$0.67 \mu\text{m/s}$
4.2 A/cm^2 , 1hour	16.1 mm	4.08 mm	$0.78 \mu\text{m/s}$
4.2 A/cm^2 , 4hour	17.8 mm	5 mm	—

(3) STS304 0.3T 2장 시편 가공결과

본 실험에서 전극의 Silver paste 박리가 발생하지 않아 코팅재로서 적합함을 재검증 할 수 있었다. 가공이 완료된 시편을 Fig. 23에 나타내었다. Fig. 23 (a)는 가공 된 공작물의 상층을 나타내었으며, Fig. 23 (b)는 하층을 나타낸 사진이다. Fig. 23 (b)의 가공폭이 (a)보다 넓은 이유는 전극의 중심축이 공작물의 정확한 중앙에 위치하지 않고 하층에 더 근접했기 때문이다. 총 11시간동안 곡선 길이 약 50mm 의 S형 곡선이 가공되었으며 가공폭은 17.2mm로 전극의 폭인 13mm보다 넓은 영역이 가공되었다. Fig. 23 (c)는 가공 곡면을 확대한 사진이다. 부드러운 연속형 곡면이 아닌 계단형의 각진 곡면을 확인할 수 있다. 이는 원통형 전극 형상의 특성상 전극의 방향 전환 시 일정한 공간이 필요하며, 공간이 확보됨과 동시에 전극이 빠르게 이동하는 과정이 반복되어 Fig. 23 (c)와 같은 형상의 곡면이 가공 되었다고 판단하였다. 본 실험을 통해 외부 자기력에 의해 전극의 방향 제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

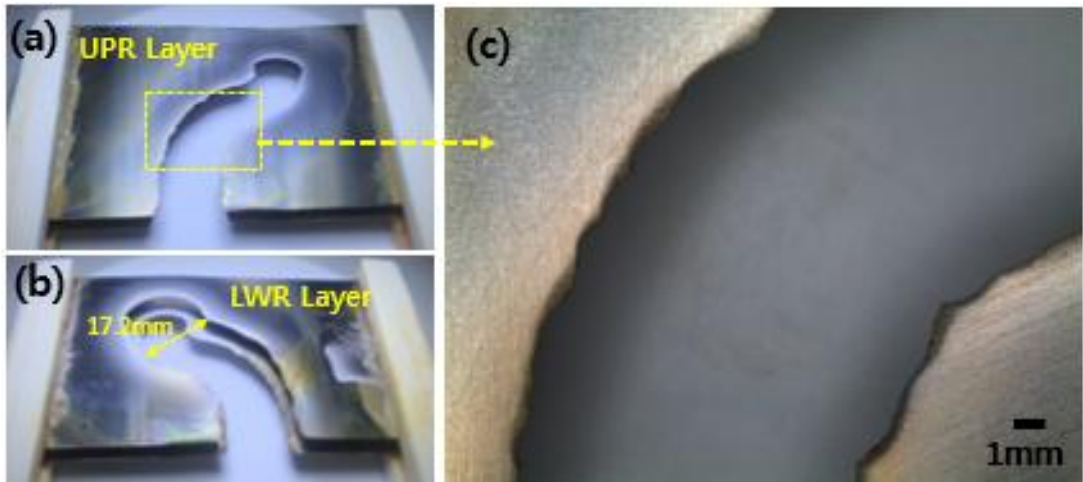


Fig. 23 Workpiece after 2-axis ECM using cylindrical electrode on STS 304 0.3T double layers

4-2. 구형 전극 공구

가. 구형 전극 공구 제작

구형 전극은 원통형 전극 공구를 사용하여 가공 시 발생하는 가공 곡면에서 발생하는 계단형 곡면을 보완하기 위해 제작하였다. 구형 전극은 방향 전환 시 공간의 제약 없이 회전이 가능하기에 추가적인 실험을 진행하기로 결정하였다. 구형의 네오디뮴 자석에 Silver paste 코팅을 4회 실시한 후 다공성 열 수축튜브 속에 삽입한다. 자석이 삽입된 열 수축튜브에 열을 가해주면 튜브가 수축하게 되어 자석을 감싸게 되는 공정을 거쳐 구형 전극 제작이 완성된다. 또한 구형 네오디뮴 자석이 원통형 자석에 비해 크기 대비 자기력의 세기가 크기 때문에 방향제어에 더욱 효과적일 것이라고 판단된다. Fig. 24는 구형 전극 공구의 제작 공정을 보여주며, Fig. 25는 완성된 구형 전극 공구 사진을 나타낸다. 열 수축 튜브가 전극과 공작물 사이의 일정한 갭과 절연 상태를 유지시켜주고 열 수축 튜브에 가공되어 있는 많은 구멍들 사이로 가공이 이루어져 가공물의 제거가 이루어진다.

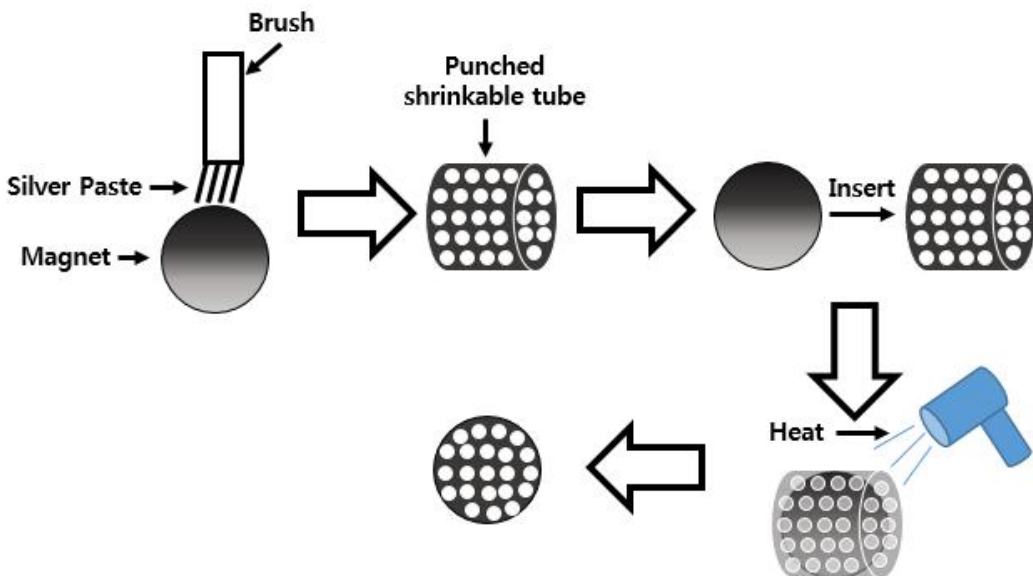


Fig. 24 Process of Spherical Electrode fabrication

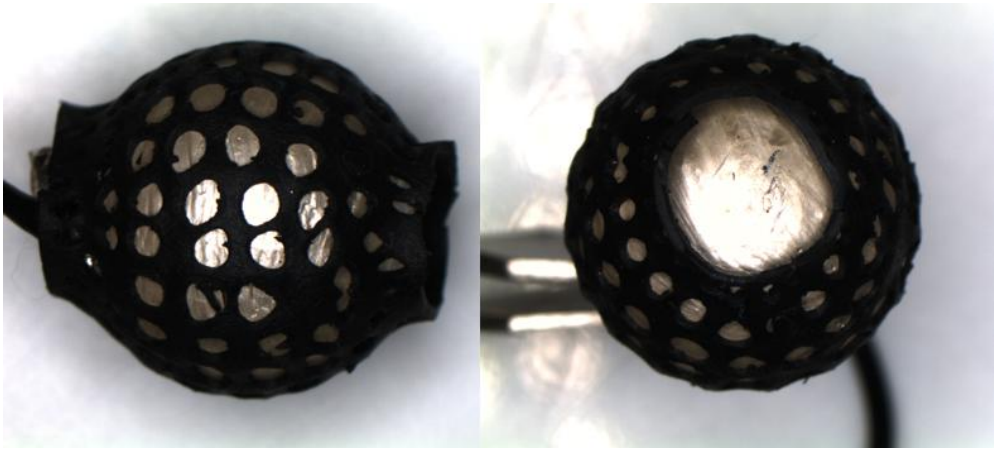


Fig. 25 Spherical Electrode tool

나. 구형 전극 공구를 이용한 실험 방법

가공에 사용될 시편은 초음파 세척을 실시하여 이물질을 제거하였다. 외부자석 2개를 사용하여 자기전극의 방향제어에 인력과 척력이 모두 작용하도록 하였다. 원통형 전극에 삽입된 네오디뮴 자석의 자기력은 2000G이지만 본 실험에 사용된 구형 네오디뮴 자석의 자기력은 5000G이므로 구형 전극 공구가 가공 방향 전환에 보다 더 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 예상된다. 실험 장치는 원통형 전극 공구를 이용한 실험과 동일하게 Fig. 18과 같이 설치하였다. 실험 조건은 20wt% NaNO₃의 전해액에 침지 상태에서 실험을 진행하였으며 30℃를 유지시켜주었다. 전해액 분사 기능이 없는 구형 전극 공구를 사용하였고, 가공이 진행되는 영역에 별도의 노즐로 전해액을 분사시켜 가공 불순물과 열을 배출시키도록 하였다. 가공이 진행될수록 가공 불순물의 농도가 증가되게 되는데 불순물과 전극의 접촉이 일어나면 가공이 중단되게 된다. 따라서 전해액의 정제를 위해 펌프를 이용하여 필터를 거쳐 정제된 전해액이 순환될 수 있도록 하였다. 전류밀도는 2.1A/cm², Duty factor 50%로 인가하였다. 자세한 실험조건은 Table. 7에 나타내었다. 외부 자석을 이동시켜 가공 방향 제어를 확인하기 위해 원통형 전극의 실험과 동일하게 최초 8시간은 외부 자석을 1시간 당 10°의 각도로 시계방향으로 회전시켜 주었으며, 이후 3시간은 반시계방향으로 회전시켜 S형 곡선의 형상을 가공하도록 하였다.

Table. 7 Experimental conditions of ECM process using spherical electrode tool on STS304 0.3T double layers

Inserted magnetic force	5000 G
External magnetic force	5000 G
Current density	2.1 A/cm ²
Machining time	11 hour
Duty factor	50 %
Electrolyte	20 wt% NaNO ₃
Electrolyte Temp	30 ℃
Workpiece	STS304 0.3T

다. 구형 전극 공구를 이용한 실험 결과

구형 전극 공구를 이용한 실험은 성공적으로 가공이 이루어 졌다. Fig. 26는 본 실험에서 가공된 시편의 사진을 보여준다. 원통형 전극 공구를 이용한 가공에서 나타난 각진 가공 곡면이 보완되어 연속되는 곡면이 가공됨을 확인할 수 있었다. 하지만 전극 공구의 폭 13mm에 비해 넓은 영역인 22.1mm이 가공되어 전극 제작 시 가공영역을 고려하여 전극 공구의 크기를 결정해야 한다. 본 실험을 통해 구형 전극 공구의 가공 방향 제어에 대한 가능성을 확인할 수 있었고 보다 고품질의 가공면을 얻을 수 있었다.

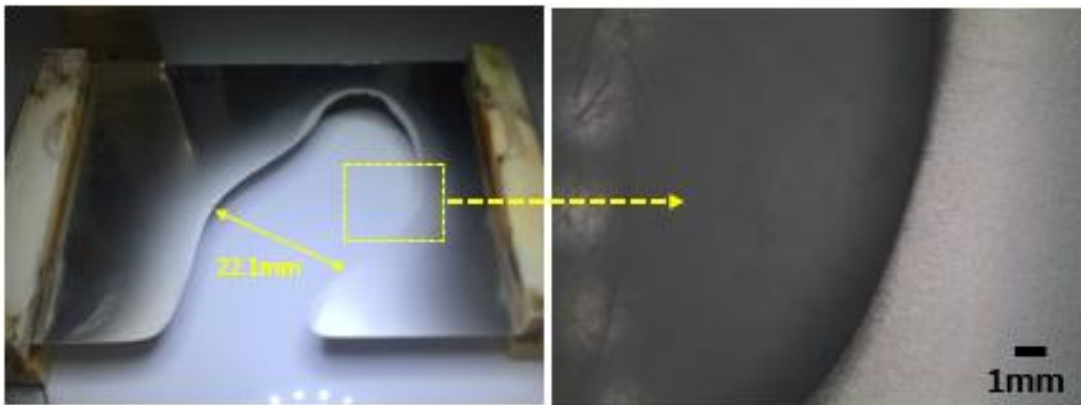


Fig. 26 Workpiece after 2-axis ECM using Spherical electrode on STS304 0.3T

제 5 장 결 론

본 연구는 외부자기력에 의해 가공 방향 제어가 가능한 전기화학가공에 관한 연구이다. 실험 결과 외부자기력으로 전극 공구의 가공 방향을 제어할 수 있음을 확인하였고 그에 적합한 전극 공구 조건도 검증할 수 있었다. 전극이송기구가 필요 없는 새로운 전기화학가공 공정 개발 가능성을 확인하였고 연구를 통해 다음과 같은 결론을 확인할 수 있었다.

1. Gilbert Model 방정식과 실험 결과를 바탕으로 분석한 자기력 그래프를 통해 두 자석 사이의 거리에 따른 자기력 변화를 확인할 수 있었으며, 외부자석의 인력만을 사용하여 전극공구를 제어할 때보다 척력과 함께 사용할 때 자기력 상승 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 자기력 분석값을 바탕으로 자기 전극 공구의 제어 범위를 결정할 수 있다.
2. 전기화학가공의 가공성에 영향을 주는 요소는 무수히 많다. 전해액도 무수한 요소 중의 하나이다. Mesh와 5T의 Plate 시편 가공 비교 실험에서 5T의 Plate 시편이 보다 안정적인 전기화학가공이 이루어진 가공 결과를 통해 전해액의 균일한 유동장 형성은 가공속도 및 정밀도를 향상시키는 요소 중 하나임을 확인할 수 있었다.
3. 원통형 전극 공구를 사용한 3가지 실험 조건의 가공 결과를 통해 외부자기력에 의해 자기 전극의 가공 방향 제어가 가능함을 검증할 수 있었다. 하지만 원통형 전극 공구 형상으로 인해 방향 전환 시 원통이 회전할 수 있는 일정한 공간이 필요하며 공간 확보와 동시에 전극이 빠르게 이동하는 과정이 반복되어 가공 곡면에 굴곡 현상이 가공되어 소재의 내부 곡선 형상 가공을 목적으로 하는 전극형상에 적합하지 않다는 것을 확인할 수 있었다.
4. 구형 전극 공구를 사용한 2축 가공 실험 결과를 통해 외부 자기력에 의해 자기 전극의 가공 방향 제어 가능성을 재검증 할 수 있었으며, 원통형 전극을 이용하여 가공할 때 발생하는 가공면 굴곡 현상 없이 부드러운 곡선 형상의 가공이 가능하게 되었다. 또한 열 수축튜브가 전극과 공작물사이의 일정한 간격을 유지하여 보다 안정적인 가공이 진행되었다. 하지만 공구 크기에 비해 가공 영역이 넓기 때문에 전극공구 제작 시 이점을 고려하여 공구의 크기를 결정하여야 한

다.

이러한 새로운 전기화학가공 공정 개발로 기존의 기계적 가공으로는 할 수 없었던 소재 내부의 자유로운 곡선 형상 가공의 가능성을 발견하였다. 외부 자기력에 의해 가공 방향 제어가 가능한 전기화학 가공은 한 가지의 전극공구로 다양한 형상의 제품을 가공할 수 있다. 이러한 가공법은 여러 분야에 응용될 수 있으며 제조 산업에 크게 기여할 것이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. V. N. Gusev, L. A. Rozhkov, Authors Certificate 2838, 1928
2. Lohrengel, M. M., Rataj, K. P., and Munninghoof, T., “Electrochemical Machining–Mechanisms of Anodic Dissolution,” *Electrochim. Acta*, Vol.201, pp. 348–353, 2016
3. J. A. McGeough, “Principles of Electrochemical Machining” , Chapman and Hall, London, 1974
4. 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
5. 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
6. K. G. Kim, “A study on the electrochemical machining of electrode tools based on 3D Printer” , Department of Mechanical System and Automotive Engineering, Graduate School of Chosun University, 2018
7. 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
8. 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
9. 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.

10. K. P. Rajurkar, J. Kozak, B. Wei, J. A. Mcgeough, “Study of pulse electrochemical machining characteristics” , Annals of CIRP, Vol.42, pp.231–234, 1993
11. 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
12. 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.
13. Hitomi. Y, Takeo. S, Maki. T, “Development of a new precision internal machining process using an alternating magnetic field” , Precision Engineering, Vol.27, pp.51–58, 2003
14. McGeough. J, “Micromachining of engineering materials” , CRC Press, 2001