



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](#)

2021년 2월  
석사학위 논문

# 자기입자가공과 펄스 전기화학 폴리싱을 이용한 하이브리드 공정의 가공특성 연구

조선대학교 대학원

기계시스템미래자동차공학과

곽성웅

# 자기입자가공과 펄스 전기화학 폴리싱을 이용한 하이브리드 공정의 가공특성 연구

A Study on the Machining Characteristics of Hybrid Machining Using  
Magnetic Abrasive Finishing and Pulse Electrochemical Polishing

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계시스템미래자동차공학과

곽성웅

# 자기입자가공과 펄스 전기화학 폴리싱을 이용한 하이브리드 공정의 가공특성 연구

지도교수      박   정   우

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함




2020년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템미래자동차공학과

곽 성 응

## 곽성웅의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	<u>조창현</u> 
위원	조선대학교	교수	<u>곽재복</u> 
위원	조선대학교	교수	<u>박정우</u> 

2020년 11월

조선대학교 대학원

## < 목 차 >

NOMENCLATURE .....	III
LIST OF TABLES .....	IV
LIST OF FIGURES .....	V
ABSTRACT .....	VIII
<b>제1장 서론 .....</b>	<b>1</b>
제1절 연구 배경 .....	1
제2절 자기입자가공(MAF) .....	4
1. 자기입자가공 개요 .....	4
2. 자기입자가공의 이론적 배경 .....	6
3. 자기입자가공의 연구 동향 .....	12
제3절 펄스 전기화학 폴리싱(PECP) .....	15
1. 펄스 전기화학 폴리싱의 개요 및 원리 .....	15
2. 전기화학 폴리싱 연구 동향 .....	20
제4절 연구목표 .....	21
<b>제2장 MAF, PECP 실험장치 및 시스템 .....</b>	<b>24</b>
제1절 MAF 실험장치 및 시스템 .....	24
제2절 PECP 실험장치 및 시스템 .....	28
제3절 측정장치 소개 .....	31

<b>제3장 MAF, PECP 교차가공 기초특성</b> .....	<b>33</b>
<b>제1절 MAF, PECP 교차가공 개요 및 사전실험</b> .....	<b>33</b>
1. STS304 표면 측정 .....	34
2. MAF 가공특성 .....	35
가. 진동 시 자석 모양에 따른 슬러리의 거동특성 .....	35
나. 시뮬레이션을 통한 자석의 자기장 분포 및 자기입자의 수직력 해석 .....	37
다. 진동Hz에 따른 MAF 가공특성 .....	42
라. 습식, 건식 MAF 가공특성 .....	46
3. PECP 가공영향 인자에 따른 가공특성 확인 .....	47
<b>제2절 MAF 가공 후 PECP 가공특성</b> .....	<b>49</b>
<b>제3절 PECP 진행 후 MAF 가공특성</b> .....	<b>51</b>
<b>제4절 MAF, PECP 교차가공 기초특성 고찰</b> .....	<b>54</b>
<b>제4장 MAF, PECP 이중공정 동시 하이브리드 가공</b> ..	<b>55</b>
<b>제1절 실험장치 및 시스템</b> .....	<b>55</b>
<b>제2절 전류밀도에 따른 하이브리드 가공특성</b> .....	<b>60</b>
<b>제3절 하이브리드 가공 후 PECP 시간에 따른 특성</b> .....	<b>64</b>
<b>제4절 이중공정 동시 하이브리드 가공특성 고찰</b> .....	<b>66</b>
<b>제5장 MAF, PECP 이중공정 순차 하이브리드 가공</b> ..	<b>69</b>
<b>제1절 실험장치 및 시스템</b> .....	<b>69</b>
<b>제2절 이중공정 순차 하이브리드 가공 특성</b> .....	<b>71</b>

1. 공작물 회전에 따른 MAF, PECP 가공특성 ..... 71  
   가. 공작물 회전에 따른 MAF 가공특성 ..... 71  
   나. 공작물 회전에 따른 PECP 가공특성 ..... 73  
   다. 이종공정 순차 하이브리드 가공에서 공작물 회전속도 고찰 ... 75  
 2. 연마입자 크기에 따른 하이브리드 가공특성 ..... 76  
 3. 하이브리드 가공시간에 따른 가공특성 ..... 80  
 제3절 이종공정 순차 하이브리드 가공특성 고찰 ..... 83  
  
 제6장 결론 ..... 86  
  
 REFERENCE ..... 88



## NOMENCLATURE

B	Magnetic flux density
$\mu$	Permeability
H	Magnetic field strength
$F_n$	Total vertical force
m	Total number of abrasive particles
S	Total area of contact between abrasive particles and workpiece
$F_t$	Total tangential directional force
x	Distance from center
W	Energy action on particles
d	Depth of cut
w	Width of cut
v	feed rate of the workpiece
u	Specific energy
T	Torque
$\omega$	Rotational speed of the wheel in radians per minute
$F_c$	Cutting force (The force tangential to the wheel)
D	Diameter of grinding wheel
N	Number of revolutions per minute on the grinding wheel
L	Length of the machining direction of the slurry spread out by the magnet
$D_e$	Equivalent diameter
A	Atomic weight
I	Current
t	Polishing time
z	Valency
F	Faraday's constant
$F_{ci}$	Cutting force of iron particle (75 $\mu$ m)
$F_{cs}$	Cutting force of STS 304 powder
$\theta$	The limiting angle that abrasive particles affect the surface

## LIST OF TABLES

Table 1.1 Chemical composition of STS 304 .....	21
Table 3.1 MAF experimental condition according to vibration frequency .....	42
Table 3.2 MAF experimental condition according to processing method .....	46
Table 3.3 PECP experimental condition according to polishing time .....	47
Table 3.4 Experimental condition of MAF→PECP according to polishing time .....	49
Table 3.5 Experimental condition of PECP→MAF according to abrasive particles size	51
Table 4.1 MAF experimental condition according to magnetic particle type .....	57
Table 4.2 Experimental condition of combine hybrid machining according to current density .....	60
Table 4.3 Experimental condition of combine hybrid machining according to PECP time after combine hybrid processing .....	64
Table 5.1 Electrical condition of rotational PECP .....	73
Table 5.2 The time workpiece is immersed in the electrolyte according to RPM .....	73
Table 5.3 Experimental condition of controlled application of process mechanisms hybrid machining according to abrasive particle size .....	77
Table 5.4 Experimental condition according to controlled application of process mechanisms hybrid machining time .....	80

## LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 Classification of machining processes .....	2
Fig. 1.2 Broad classification of hybrid machining processes .....	3
Fig. 1.3 Schematic illustration of MAF classification according to machining type .....	5
Fig. 1.4 Schematic illustration of the MAF method used in this study .....	5
Fig. 1.5 Variation of the magnetic flux density of ferromagnetic material .....	6
Fig. 1.6 Schematic illustration of MAF, grinding process .....	8
Fig. 1.7 Schematic diagram of comparison between MAF process and grinding process .....	10
Fig. 1.8 RPM of grinding theory according to magnetic Hz .....	11
Fig. 1.9 Interpolar reaction diagram .....	15
Fig. 1.10 Schematic illustration of electrochemical polishing mechanism .....	17
Fig. 1.11 Current density–voltage curve of electrochemical polishing .....	18
Fig. 1.12 An schematic of electrolyte flow and micro-pit image .....	19
Fig. 1.13 Anticipated schematic of synergy effect of MAF, PECP hybrid machining .....	22
Fig. 1.14 The process of proceeding this study .....	23
Fig. 2.1 MAF machining condition determination process .....	24
Fig. 2.2 Schematic illustration of MAF experimental setup .....	26
Fig. 2.3 A picture of vibration-related devices .....	26
Fig. 2.4 Processes of magnetic abrasive finishing .....	27
Fig. 2.5 Diagram of factors affecting PECP processing .....	28
Fig. 2.6 PECP experimental setup .....	29
Fig. 2.7 A picture of power supply and oscilloscope .....	29
Fig. 2.8 PECP process .....	30
Fig. 2.9 A picture of observation, measuring device .....	31
Fig. 3.1 Schematic diagram of sequential processing experiment .....	33
Fig. 3.2 STS304 Surface .....	34
Fig. 3.3 AFM image of STS304 surface .....	34
Fig. 3.4 Distribution of slurry according to magnetic shape .....	35
Fig. 3.5 Elimination of slurry according to magnetic force form .....	35
Fig. 3.6 Geometry setting .....	37

Fig. 3.7 Magnetic flux density analysis results .....	38
Fig. 3.8 Schematic diagram of vertical force variance of magnetic and abrasive particles .....	38
Fig. 3.9 Machining depth trend line according to normal force .....	40
Fig. 3.10 Schematic diagram of machining width calculation .....	40
Fig. 3.11 AFM measurement location .....	42
Fig. 3.12 MAF processed surface according to frequency .....	43
Fig. 3.13 AFM images according to vibration frequency .....	43
Fig. 3.14 Surface Ra, Rz value variation graph according to vibration frequency .....	44
Fig. 3.15 Surface image analysis process .....	45
Fig. 3.16 Surface defects histogram according to Hz .....	45
Fig. 3.17 CCD camera view by processing method .....	46
Fig. 3.18 AFM measurement location .....	47
Fig. 3.19 CCD camera view according to polishing time .....	48
Fig. 3.20 CCD camera view according to PECP time on MAF surface .....	50
Fig. 3.21 CCD camera view according to particle size and MAF time .....	51
Fig. 3.22 AFM results according to particle size and MAF time .....	52
Fig. 4.1 Combined hybrid machining experimental apparatus .....	55
Fig. 4.2 Process schematic diagram of MAF, PECP and Combined hybrid machining .....	56
Fig. 4.3 AFM measurement results according to type of magnetic particle .....	57
Fig. 4.4 Machining depth according to machining time .....	59
Fig. 4.5 AFM measurement area .....	61
Fig. 4.6 CCD camera view according to current density .....	61
Fig. 4.7 AFM results according to current density .....	62
Fig. 4.8 Machining depth according to current density .....	63
Fig. 4.9 CCD camera view of surface according to processing time .....	65
Fig. 4.10 Microscopic image of magnetic particles (x90) .....	66
Fig. 4.11 Schematic diagram of MAF, PECP combine hybrid machining mechanism .....	67
Fig. 4.12 Two cases in which magnetic particles interfere with electrochemical reactions .....	67
Fig. 5.1 Schematic illustration of experimental apparatus .....	69
Fig. 5.2 Picture of experimental apparatus .....	70
Fig. 5.3 Characteristics in vertical MAF processing .....	72
Fig. 5.4 Schematic diagram of polishing area (front view) .....	73

Fig. 5.5 CCD camera view according to rotation per minute of workpiece ..... 74  
 Fig. 5.6 Schematic diagram of PECP area ..... 76  
 Fig. 5.7 Measurement area ..... 77  
 Fig. 5.8 CCD camera view according to abrasive particle size ..... 77  
 Fig. 5.9 AFM images of surface according to abrasive particle size ..... 78  
 Fig. 5.10 A comparison of surface glosses ..... 79  
 Fig. 5.11 CCD camera view according to hybrid machining time ..... 81  
 Fig. 5.12 Surface defects histogram according to machining time ..... 81  
 Fig. 5.13 Mechanism of magnetic abrasive finishing ..... 84  
 Fig. 5.14 Flattening mechanism according to abrasive particle size ..... 84

## ABSTRACT

A study on the Machining Characteristics of Hybrid Machining Using Magnetic Abrasive Finishing and Pulse Electrochemical Polishing

Kwak, Seong-Ung

Advisor: Prof. Park Jeong Woo, Ph. D

Dept. of Mechanical System and

Automotive Engineering

Graduate School of Chosun University

With the recent upgrading of industry, products are becoming smaller and more complex in shape. At the same time, high dimensional accuracy and high quality of material are required. The quality of the product surface in the current trend is one of the key attributes of modern manufacturing. To respond to the various shapes and high quality required by high-tech industries, in the field of ultra-precision machining, use non-traditional machining methods(MAF, ECP, EDM, PCM, etc.) that are different from conventional machining methods, or use hybrid machining that combines two or more already used processing methods to enhance the quality of processed products, or improve the quality of processed products, and composites. In this study, among non-traditional machining methods, MAF(Magnetic abrasive finishing) and ECP(Electrochemical polishing) were used to obtain high quality surfaces. MAF is a machining method that reduces surface roughness by flattening the surface by rotating a magnet with magnetic particles attached to it, or by rotating a workpiece, such as a pipe, between the magnet and the magnetic particles. The ECP uses electrochemical reactions to melt the surface of the workpiece, smoothing it out, lowering the surface roughness. It also removes impurities from the surface and produces a

stable oxide film to increase corrosion resistance. ECP is non-contact machining, so it has the advantage of being applied to complex shapes, and has glossy features. The purpose of hybrid machining for processing surfaces is to obtain high quality surfaces, reduce processing time by reducing the number of processes, or use different process energy to lower processing costs, and to machining difficult to cut material easily. The types of hybrid machining can be divided into Assisted hybrid machining and Combined hybrid machining, controlled application of process mechanisms, depending on the material removal area. In this paper, a non-traditional machining method, noting that MAF is applicable to various shapes and is accessible by simple devices, Based on the existing method of fusion electrochemical machining in hybrid machining to increase efficiency, PECP, which can be applied to various shapes that are advantages of MAF, can be fused in various ways and analyzed hybrid machining characteristics. Equipment for observing and measuring machined surfaces is optical microscopy and AFM. The AFM measurement method is focused on the table and the CCD camera first checks the surface. The measurement conditions were determined by  $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$  as the reference range, and the surface measured by AFM was analyzed through XEI program, and the local surface was checked for smoothness as well as whether Ra, Rz, and points were removed based on the cross-sectional line.

MAF and PECP cross-processing is an experiment to check the effect of each process on each other. Process and compare and analyze MAF, PECP and PECP, MAF in two order. The first control group is the surface of STS304 plate before machining, the second control group is the surface of STS304 plate with only MAF, and the third control group is the surface of STS304 plate with only PECP. The first comparator measures a large point shape, with a Ra value of 40 to 60. The second control analysis analyzed the vertical force applied by magnetic particles on the surface and found that it represented a value similar to the theoretical formula. And the higher the frequency, wet processing the better the result surface. The third comparator analyzed the result surface over time and identified the surface by polishing time. The first group of experiments is the PECP machining characteristic after MAF machining and the purpose is to identify the effect of PECP on the surface of MAF. As a result of the experiment, if PECP is applied to a surface that has been MAF, defects will be filled faster than those that only PECP has. The second group is MAF processing after PECP. The purpose of this experiment is to conduct MAF

on the surface of advancing PECP, to determine how MAF affects the surface of PECP. The results of the experiment showed that particle processing on already smoothed surfaces through PECP was different from normal particle processing mechanisms, and the result surface was measured with AFM, which showed good result surfaces in a short period of time with small-sized magnetic particles mixed with large abrasive particles. Micro-pit caused by PECP was also removed by particle processing. But the scratch marks from particle processing must remain on the surface, so it is not appropriate to finish with MAF.

The first method of hybrid machining of MAF and PECP(Combined hybrid machining). Two or more processes simultaneously contribute to material removal, and both processes affect the same processing area. It is known that the cross-process simultaneous hybrid processing method shows improved material removal rate and surface integrity. The experimental device was constructed by matching the processing areas of the two processes, and the results showed that large Pits were generated on the surface regardless of current density, and Ra value of surface roughness was higher than that of the pre-process surface. The machining depth is  $22\mu\text{m}$  at  $0.4\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $23\mu\text{m}$  at  $0.6\text{A}/\text{cm}^2$  and  $31\mu\text{m}$  at  $0.8\text{A}/\text{cm}^2$ , and 1.43 to 1.83 times deeper than the surface where only PECP was processed. As a result, the combined hybrid processing method of cross-processes has shown that the material removal rate has improved but the surface quality has decreased. This seems to increase the material removal rate as PECP electrochemical reaction helps MAF particle processing. However, observing the magnetic particles used in processing, it appears that MAF interferes with the electrochemical reactions of the PECP, resulting in poor surface solubility, and a stable oxide layer because mechanical machining removes the formation of the oxide layer. Therefore, for simultaneous hybrid processing of cross-processes, matching the processing area has an adverse effect on surface quality, so a convergence method that can have a positive effect on each other, such as basic characteristics of cross-process processing, is needed without MAF and PECP interfering with each other.

The second method of converging MAF and PECP is cross-process sequential hybrid processing. This experimental device is designed to repeat MAF and PECP during the entire machining process, based on the results obtained from the high quality surface, if MAF and PECP are carried out on the surface where PECP has been performed on the



surface where MAF and PECP have been cross-processed. First, the characteristics of PECP and MAF were identified according to rotation because the workpiece rotates, and the faster the rotation speed, the better the electrochemical reaction occurred, and the slurry was eliminated from the magnetic particle processing. Thus, the optimal RPM is set at 0.5, with no slurry being eliminated, and experiments were conducted on other influencing factors. The first experiment involved sequential hybrid processing experiments that differed in the size of abrasive particles. The experimental results showed that the conditions using 3~5 $\mu\text{m}$  abrasive particles showed lower Ra and Rz values than the result surface using 0.5  $\mu\text{m}$  and 1.5 $\mu\text{m}$  abrasive particles, and the Ra values were 9.5nm to correspond the research target surface roughness. The second experiment analyzed the result surface according to the sequential hybrid processing time and confirmed through the image analysis program that the number of defects on the surface increases as the processing time increases. The results confirmed that the optimum PECP time tends to be the same as the optimum hybrid machining time. And as shown in the cross processing, MAF is not able to remove the micro-pit from the PECP, and it is judged that the last process in sequential hybrid processing is PECP. Therefore, it is considered appropriate to use abrasive particles larger than MAF to remove micro-pit by using small abrasive particles to help flatten the surface.

# 제1장 서론

## 제1절 연구 배경

최근 산업의 고도화로 인해 제품은 점차 소형화되고, 형상이 복잡해지고 있다. 동시에 높은 치수정밀도와 소재의 높은 품질이 요구된다. 현 추세에서 제품 표면의 품질은 현대 제조의 핵심 속성 중 하나다. 최근에는 지속 제기되어온 온실가스 문제가 심화되어, 전 세계적으로 탄소 배출 규제의 정도가 높아지고 있고, 화학연료를 대체할 수 있는 친환경 에너지 개발에 힘쓰고 있다. 우리나라 정부에서도 화석연료 중심의 에너지 시스템에서 수소를 에너지원으로 활용하는 수소경제를 제안하고, 수소의 생산, 저장, 운송에 필요한 모든 분야의 산업 육성에 초점을 맞추어 2018년 8월 ‘혁신성장전략투자방향’에서 수소경제를 3대 투자 분야 중 하나로 선정했다.[1] 수소는 높은 에너지 효율을 가지고 있고, 구하기 쉬우며, 탈 탄소화, 미세먼지 저감 등 여러 방면의 장점이 있다. 하지만 고순도, 고압, 대용량의 수소를 저장 및 운송하기 위해서는 오랜 기간 사용에도 부식, 박테리아가 잘 발생하지 않는 고품질 표면의 파이프라인, 저장 탱크가 필요하다. 반도체 클린룸(Clean room) 설비에서도 대부분 고순도 액, 가스를 사용하기 때문에 재료 표면에 결점이 없는 고품질 표면을 가진 제품이 필요하다. 이외에 식품, 화학, 바이오, 원자력기기 등 다양한 첨단 산업 분야에서 제품 표면의 품질은 중요한 위치를 점하고 있다. 초정밀가공분야에서는 산업발전의 흐름에 맞추어 다양한 방식으로 치수정밀도를 높이고, 복잡한 형상을 가공하거나, 고품질의 표면을 얻기 위한 연구가 활발하게 진행되어, 실제 산업에 적용하고 있다. 첨단 산업에서 요구하는 다양한 형상과 높은 품질을 맞추기 위해 초정밀가공분야에서는 기존의 가공방식과 다른 비전통 가공방식(MAF, ECP, EDM, PCM 등)을 이용하여 목적에 맞는 가공을 하거나, 이미 사용되는 두 가지 이상의 가공방식을 융합한 하이브리드 가공을 이용해, 가공제품의 품질을 높이거나, 난삭재(Difficult to cut materials), 복합재료(Composite material)를 가공하는 연구가 진행되고 있다.

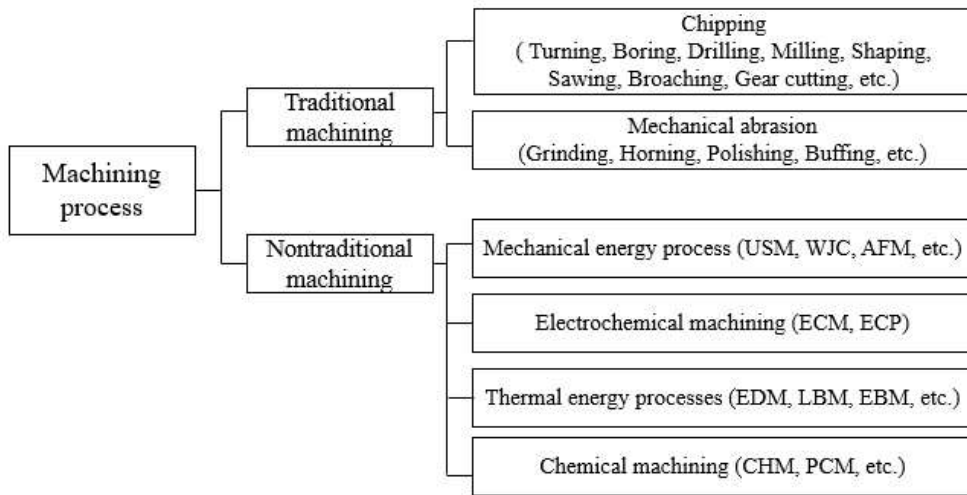


Fig. 1.1 Classification of machining processes

Fig. 1.1은 가공방식을 기존 가공방식과 비전통적인 가공방식으로 분류한 개략도이다.[2] 본 연구에서는 고품질의 표면을 얻기 위해 비전통적인 가공방법 중, MAF(Magnetic abrasive finishing)와 ECP(Electrochemical polishing)를 이용하여 연구를 진행했다. MAF는 자석과 자기입자(Magnetic particle) 사이의 인력을 이용해 자기입자가 붙어있는 자석을 회전시키거나, 자석과 자기입자 사이에 파이프 등의 공작물 놓고 공작물을 회전시켜 표면을 평탄화(Flattening)하여 표면거칠기(Surface roughness)를 낮추는 가공방법이다. MAF는 자기입자와 연마입자(Abrasive particles)를 혼합한 슬러리(Slurry)만이 공작물에 접촉하기 때문에, 다양한 형상에 적용가능하고, 가공 중 제어가 쉬우며, 입자가 고정되어 가공하는 기존연마방법과 다르게 열적 결함(Burns and thermal defects)이 적고, 글레이징(Glazing) 현상이 적어 작은 크기의 연마입자(Abrasive particles)를 쉽게 활용할 수 있는 장점이 있다. MAF는 의료, 광학, 전기, 엔진부품 등 다양한 제품가공에 적용된다. ECP는 전기화학적 반응을 이용해 공작물 표면을 용융시켜 평활화(Smoothness)하여 표면거칠기를 낮춘다. 또 표면의 불순물을 제거하고 안정적인 산화막을 생성하여 내식성을 높인다. ECP는 비접촉가공이므로 복잡한 형상에 적용할 수 있는 장점이 있고, 광택이 나는 특징이 있다. 또 친수성 효과가 있어 반도체 설비, 의료기기, 바이오, 식품, 인체 친화형 제품에 이용된다.

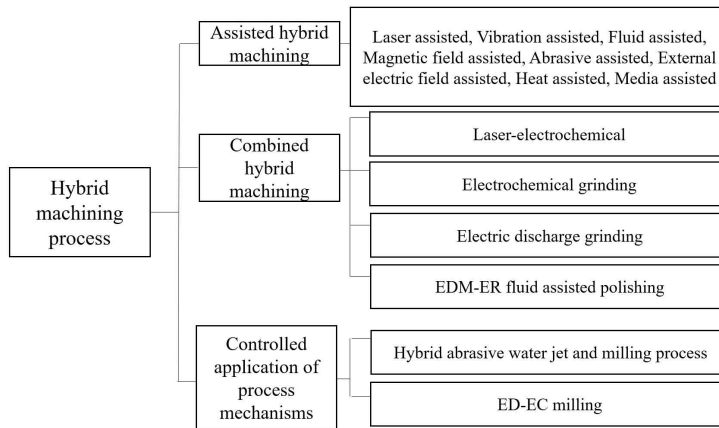


Fig. 1.2 Broad classification of hybrid machining processes.

Fig. 1.2는 두 가지 이상 가공법의 융합방식에 따른 하이브리드 가공을 분류한 개략도이다.[3] 표면을 가공하기 위한 하이브리드 가공의 목적은 높은 품질의 표면을 얻거나, 공정의 수를 줄여 가공시간을 줄이거나, 서로 다른 프로세스에너지를 사용하여 가공 비용을 낮추고, 난삭재를 쉽게 가공하는 것에 목적이 있다. 하이브리드 가공의 종류는 Fig. 1.2처럼 Assisted hybrid machining과 Combined hybrid machining, Controlled application of process mechanism로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 순서대로 다중물리 하이브리드 가공, 이종공정 동시 하이브리드 가공, 이종공정 순차 하이브리드 가공으로 칭한다. 다중물리 하이브리드 가공은, 기존의 가공방식은 유지하며 가공하는 동안, 레이저, 진동 등의 추가적인 요소가 공작물의 다른 위치에서 영향을 주어 기존 가공방식에 도움을 주는 방법이다. 이종공정 동시 하이브리드 가공은 두 가지 이상의 공정이 동시에 재료 제거에 기여하고, 같은 가공영역에 영향을 미친다. 이러한 공정은 향상된 재료제거율(Material removal rate)과 표면 무결성을 보여 큰 잠재력을 가진다. 이종공정 순차 하이브리드 가공은 공정 체인(Chain)을 줄이거나 동일한 기계 플랫폼에서 서로 다른 두 공정을 결합하기 위한 목적의 하이브리드 가공방법이다. 이 방식은 한 기계에서 두 공정 모두 재료제거에 직접 관여하지만, 가공하는 영역이 분리되어있다.[4] 본 논문에서는 MAF가 다양한 형상에 적용가능하고 표면을 평탄화 하는 장점과, 단순한 장치로 접근 가능한 점에 주목하여 비전통가공인 MAF를 선택하였고, 기존에 하이브리드 가공에서 기계적 가공이 효율을 높이기 위해 전기화학적 가공을 융합하는 방식에 착안하여, MAF의 단점인 표면의 요철(凹凸)부를 용해할 수 있고, MAF의 장점인 다양한 형상에 적용가능한 공통점이 있는 PECP를 선택하여 여러가지 방식으로 융합하고 하이브리드 가공특성을 분석했다.

## 제2절 자기입자가공

### 1. 자기입자가공 개요

자기입자가공(MAF)은 자석과 자기입자간의 인력을 이용하여, 자기입자와 연마입자를 혼합한 슬러리를 공작물의 가공 위치에 놓고 자석을 회전하거나 공작물을 회전하여 표면을 평탄화하고 표면거칠기를 낮추는 가공방법이다. 자기입자가공은 장치가 간단하고, 공작물 재질에 구애받지 않고, 자석을 이용해 쉽게 입자 제어가 가능하다. 또 자유입자를 사용하기 때문에 가공표면에 열적 결함이 적고, 글레이징 현상이 적어 크기가 작은 연마입자를 활용할 수 있는 장점이있다. 자기입자가공은 자석과 슬러리, 공작물의 위치에 따라 가공방식을 나눌 수 있다. 자기입자가공의 두 가지 형태를 아래 Fig. 1.3에 나타내었다. 첫 번째 방식은 Fig. 1.3 A와 같이 자석에 슬러리를 직접 부착하여 회전시켜 표면을 가공하는 방식으로, 자석에 슬러리를 붙이면 전자기장의 영향으로 슬러리가 Magnetic brush 형태로 배열되는 특징을 이용한 방식이다.[5] 두 번째 방식은 슬러리와 자석 사이에 공작물을 위치시켜 공작물 또는 자석을 회전시키면서 표면을 가공하는 방식이다.[6] 두 방식은 구조적인 차이로, 입자가 공작물에 가하는 힘이 달라지므로 구분해서 보아야 한다.

본 연구는 두 번째 방식에서 공작물을 평판으로 바꿔 회전시키지 않고, 자석 자체에 직선 방향으로 진동을 부여해 왕복 운동하며 연마하는 방식으로, 두 번째 방식의 변형된 형태이다. 가공 진행 시 공작물에 가해지는 힘은 Fig. 1.3 B 두 번째 형태와 같다. 본연구에서 사용되는 자기입자가공 방식의 개략도를 Fig. 1.4에 나타내었다.

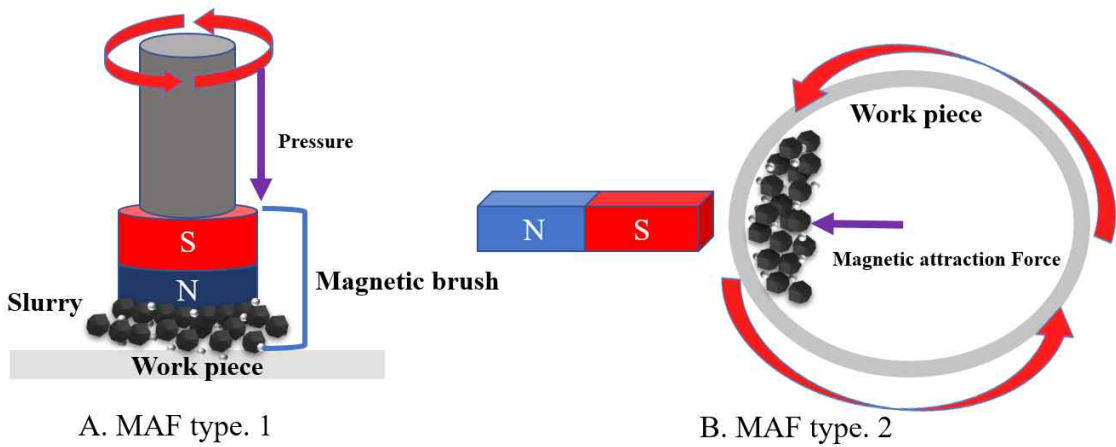


Fig. 1.3 Schematic illustration of MAF classification according to machining type

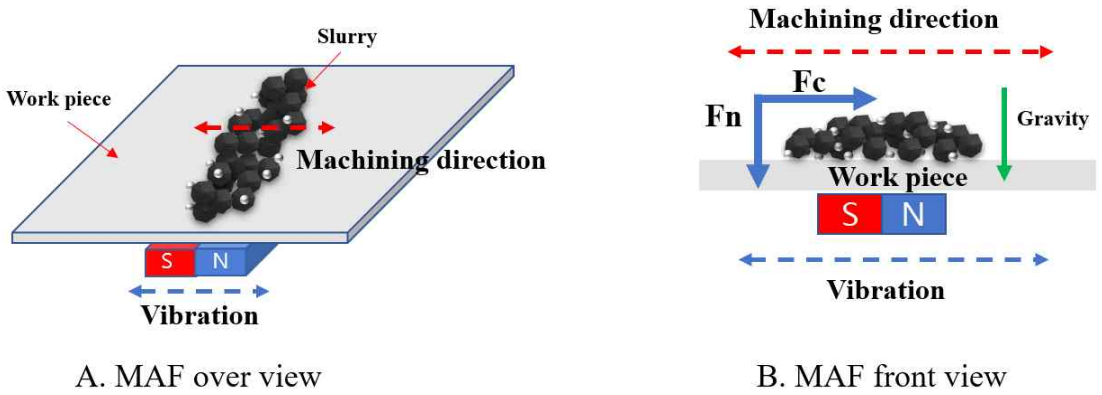


Fig. 1.4 Schematic illustration of the MAF method used in this study

## 2. 자기입자가공의 이론적 배경

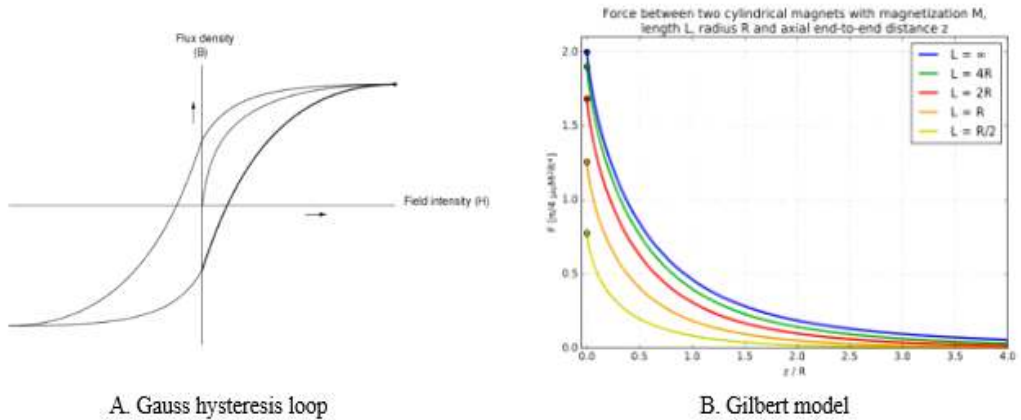


Fig. 1.5 Variation of the magnetic flux density of ferromagnetic material

Fig. 1.5의 A. Gauss hysteresis loop는 강자성체의 자계의 세기(Magnetic field strength)와 자속밀도(Magnetic flux density)의 관계를 나타내는 곡선[7]으로, 강자성체의 자기적 성질을 표시한다. 자석의 자기선속밀도 계산식은 아래 식(1)과 같고, 자기선속밀도를 보통 자기장의 세기 B라고 하고 단위는 T이다. 자계세기 H의 단위는 A/m이다.

$$B = \mu H \tag{1}$$

B : Magnetic flux density

$\mu$  : Permeability

H : Magnetic field strength

Fig. 1.3에서 자기입자가공의 첫 번째 방식은 위의 자력에 의한 힘의 특성과 공구의 회전력에 의한 접선 방향의 힘의 특성이 동시에 작용해 실제 가공을 수행한다. 따라서 공작물 표면에서 발생하는 전체 법선 방향 힘은 자속밀도, 법선 방향 힘  $F_n$ , 공구 회전에 의한 접선 방향 힘  $F_c$ 의 합력  $F_t$ 에 의해 연마가 이루어진다. 첫 번째 MAF 방식의 이론모델에서 식(2)과 같은 형태로 시뮬레이션 되었다.[8]

$$F_n = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_{fm}}\right) S \quad (2)$$

$F_n$  : Total vertical force

$m$  : Total number of abrasive particles

$S$  : Total area of contact between abrasive particles and workpiece

그리고 슬러리와 공작물 사이에 발생하는 전체 접선 방향의 힘  $F_n$ 은 식 (3)과 같다. 여기서  $x$ 는 자력이 발생하는 공구 중심에서 원주 방향의 거리를 나타낸다. 그리고  $W$ 는 공구와 공작물 사이 입자에 작용하는 에너지이고,  $W$ 는 자력에 의한 에너지, 입자 사이에 척력에 의해 발생하는 반발에너지, 공구가 회전하며 공구 끝단에서 발생하는 인장 에너지의 합이다.

$$F_t = \frac{dW}{dx} \quad (3)$$

$F_t$  : Total tangential directional force

$x$  : Distance from center

$W$  : Energy action on particles

Fig. 1.3 B에서 자기입자가공 두 번째 방식은 자력의 힘으로 접선 방향의 힘이 동시 작용하여 가공을 수행하는 영역이 같으나, 자석과 슬러리 사이에 공작물이 위치하기 때문에, 자석과 슬러리 사이의 간격이 공작물의 두께에 의해 결정된다. 따라서 두 번째 방식의 자기입자가공의 경우 절삭력에 영향을 미치는 주요 인자는 자석과 슬러리 사이의 간격이다. Fig. 1.5 B. Gilbert model은 자석 간 거리에 따른 인력의 변화 그래프이다. 이 모델을 기준으로 보았을 때 0mm에서 2.5mm까지 원래 자속밀도의 10%까지 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있고[9], 이는 자석과 슬러리 사이의 간격을 결정하는 공작물의 한계 두께라고 볼 수 있다.



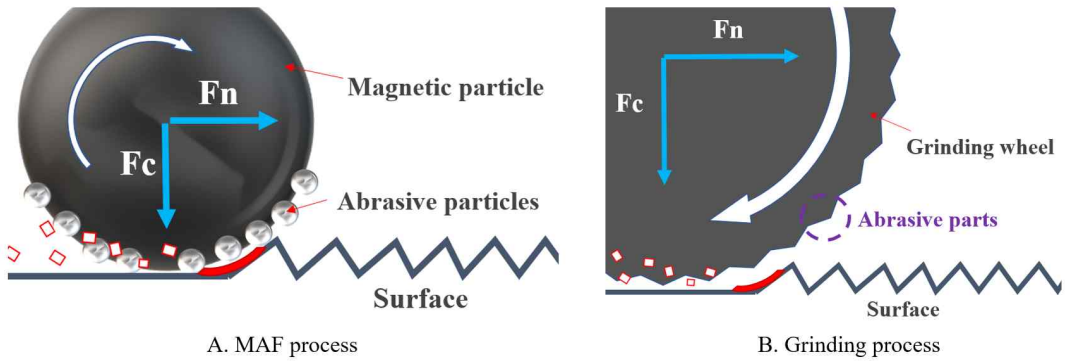


Fig. 1.6 Schematic illustration of MAF, grinding process

Fig. 1.6 A는 본 연구에서 주로 사용되는 자기입자가공 방식의 이론적 배경이 되는 개략도이고, B는 일반적인 연삭 가공을 나타낸 개략도이다. B 개략도에서 연삭부분 (Abrasive parts)을 확대하면 A와 같다고 볼 수 있고, 이를 토대로 일반 연삭 이론을 본 연구의 자기입자가공 형태에 맞게 변형하여 본 연구에서 사용된 자기입자가공 형태의 절삭력을 계산했다. 기존 연삭 이론에서 MRR(Material removal rate)은 식(4)에 의해 계산될 수 있고, 기존 재질에 따른 비에너지  $u$ (specific energy)와 MRR로 공정에 소모되는 힘(Power)을 식(5)에 따라 계산할 수 있다.[10]

$$MRR = dwv \quad (4)$$

d : Depth of cut

w : Width of cut

v : feed rate of the workpiece

$$Power = (u)(MRR) \quad (5)$$

u : Specific energy

식(5)에서 계산한 Power는 식(6)으로 다시 나타낼 수 있고, 식(6)에서 T는 식(7),  $\omega$ 는 식(8)로 다시 나타낼 수 있다.

$$Power = T\omega \quad (6)$$

T : Torque

$\omega$  : Rotational speed of the wheel in radians per minute

$$T = F_c D / 2 \quad (7)$$

$F_c$  : Cutting force (The force tangential to the wheel)

D : Diameter of grinding wheel

$$\omega = 2\pi N \quad (8)$$

N : Number of revolutions per minute on the grinding wheel

식(7)에 의해  $F_c$ 를 구하고 기존의 실험적 결과에서  $F_n$ 은  $F_c$ 보다 30% 높으므로 결론적으로 식(9)에 의해  $F_n$ 을 구할 수 있다.

$$F_n = 1.3 \times F_c \quad (9)$$

$F_n$  : Normal force (The force normal to the workpiece surface)

이 계산방식을 본 연구에서 사용되는 자기입자가공 방식의  $F_n$ ,  $F_c$ 을 구하는데 적용한다. 먼저 본 연구의 자기입자가공 방식에서는 Grinding wheel을 사용하지 않고 직선운동하기 때문에 Grinding wheel의 D와 회전수 N을 대입할 수 없다. 따라서 T를 구하기 위한 식(7)의 D와  $\omega$ 를 구하는 식(8)의 N에 대한 변형이 필요하다. Fig. 1.7은 연삭 가공에서 D와 N이 본 연구의 MAF 방식에서 자석에 의해 가공 방향으로 슬러리가 펼쳐진 길이 L(Length of the machining direction of the slurry spread out by the magnet), 진동주파수 Hz으로 대체될 수 있음을 보여주는 개략도이다.

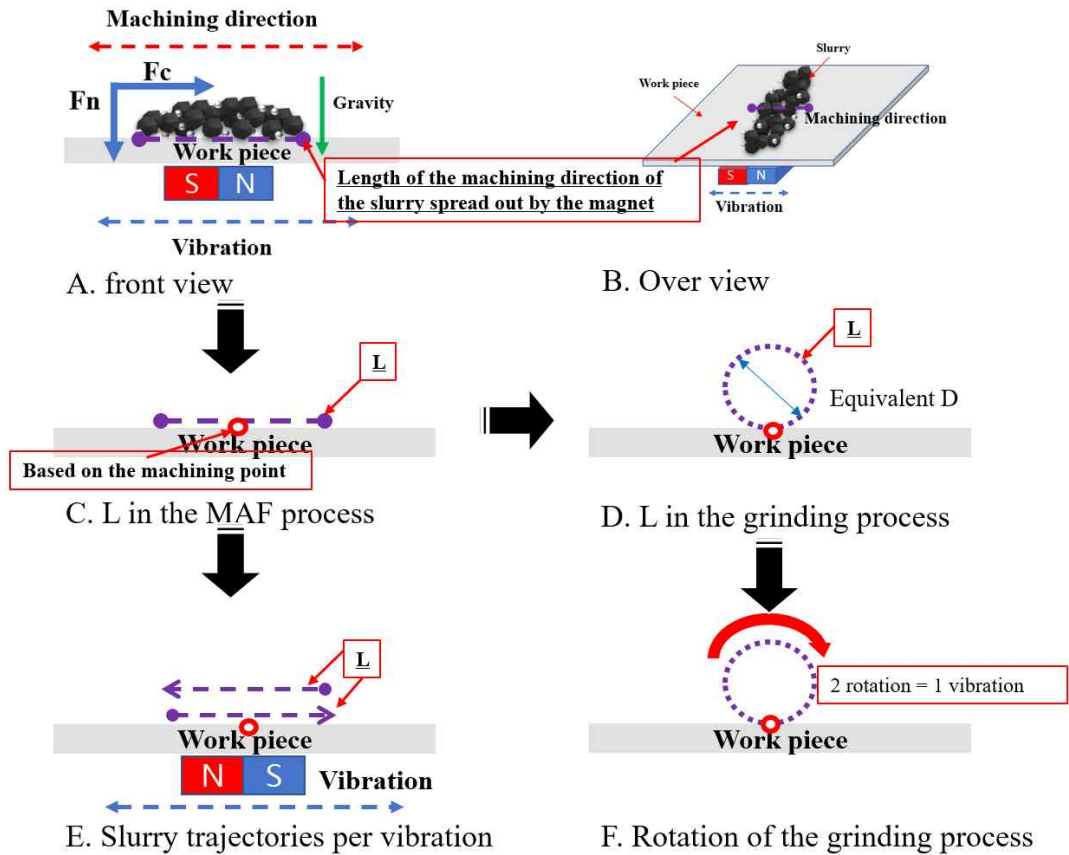


Fig. 1.7 Schematic diagram of comparison between MAF process and grinding process

Fig. 1.7 A. 정면도를 보면, 자기입자가공에서 자석에 의해 펼쳐진 슬러리의 가공방향 길이를 L(Length of the machining direction of the slurry spread out by the magnet)로 정하고, C에서 기준 가공점(Machining point) 기준에서 자석이 좌로 움직이면 L의 길이로 펼쳐진 연마입자가 L의 길이로 한번 가공했다고 볼 수 있고, 이 L을 원의 형태로 만들면 Fig. 1.7 D<sub>e</sub>(Equivalent diameter)의 형태로 볼 수 있다. 여기서 원주 구하는 식에 L을 대입하면 식(10)와 같다. 따라서 식(10)는 연삭 이론에서 변수  $D_e$ 를 MAF의 변수 L로 바꿀 수 있다.

$$L = D_e \times \pi \tag{10}$$

L : Length of the machining direction of the slurry spread out by the magnet

$D_e$  : Equivalent diameter

Fig. 1.7 E의 가공기준점의 관점에서 자석이 1회 진동 시 L의 길이만큼 좌우로 총 2번 가공된다. Fig. 1.7 F의 가공기준점 관점에서 1회 회전에 L만큼 연마입자가 접촉한다고 볼 수 있다. 따라서 Grinding wheel이 2회 회전해야 E와 같이 한 가공점 기준으로 두 번 가공되며, 본 연구에서 변수로 작용하는 진동주파수(Hz)와 연삭 이론에서 변수 RPM을 1대1로 대응시킨 그래프를 Fig. 1.8에 나타내었다.

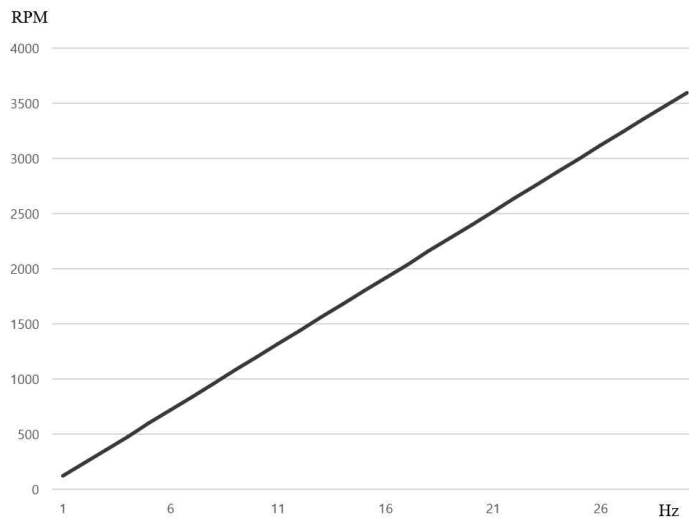


Fig. 1.8 RPM of grinding theory according to magnetic Hz

본 연구에서 자기입자가공면의 MRR은 가공 후 가공깊이 측정을 통해 구할 수 있으며, 재질에 따른 비에너지표에 따라  $u$ 값을 대입하여 전체 Power를 구할 수 있다. 여기서 식(6)의  $D$ 는  $L$ 로, 식(7)의  $N$ 을 Hz로 바꾸어 정리하면 식 (11)과 같다.

$$F_c = \frac{(u)(MRR)}{L(120Hz)} \tag{11}$$

식(11)으로  $F_c$ 를 구할 수 있고,  $F_c$ 와  $F_n$ 의 기존의 실험적인 결과에 따라 보정하여 입자가 가공표면에 수직으로 작용하는 힘  $F_n$ 을 구할 수 있다.

## 2. 자기입자가공 연구 동향

자기입자가공은 비전통 가공의 한 종류로 Harry Coat가 1938년 특허를 내면서 미국, 프랑스, 영국, 불가리아, 일본, 독일 등의 나라에서 자기입자가공이 발전되었다. 자기장을 이용한 가공은 공정 시스템의 특징에 따라 MAF(Magnetic Abrasive Finishing), MEAP(Magneto-Electrolytic Abrasive Polishing), UMA(Unbonded Magnetic Abrasive), MFAAF(Magnetic Field Abrasive Finishing)등 다양하게 불리고, 본 논문에서는 공작물에 가해지는 힘의 형태에 따라, 자석에 직접 슬러리를 부착하여 가공하는 Magnetic brush 형태와 자석과 슬러리 사이에 공작물을 위치시키고 공작물을 움직여 가공하는 두 가지 형태로 분류하고 MAF로 통칭한다.

MAF의 연구는 크게 공작물에 미치는 힘에 대한 연구, 가공에 영향을 미치는 인자에 따른 실험적인 연구, MAF의 가공성능을 높이기 위한 가공방식융합 및 변형에 대한 연구, 다양한 형태 및 소재에 적용하는 연구로 나누어볼 수 있다. 공작물에 미치는 힘에 관한 연구는 MAF를 수학적 모델링하는 연구를 시작으로, 측정장치가 발전됨에 따라 Dynamometer를 이용해  $F_n$ ,  $F_c$ 를 측정하고 측정값과 수학적 모델을 비교하는 연구(2013. Ganguly, V. et al.)[11]가 진행되었고, 공작물의 자성, 비자성 여부에 따른  $F_n$ ,  $F_c$  측정 및 이론과 차이 분석 연구(2019. Jain, V. K. et al.)[12]등 MAF에서 자기입자와 연마입자가 공작물에 미치는 절삭력에 관한 연구가 지속진행되고 있다. MAF에 영향을 주는 인자에 대한 실험적 연구는 자기입자의 무게에 따른 가공특성 분석, 가공 전후의 연마입자 형태에 대한 연구(2003. Mori et al.)[12]가 진행되었고, 자기장의 세기, 자석과 공작물 사이의 간격, 연마재 종류, 회전속도, 압력 등 MAF에 영향을 주는 인자들에 대한 실험이 진행되었다.(1984. Sinmura et al.)[13] 그리고 주요 인자별 연구결과를 ANOVA(Analysis of variance)분석을 통해 가공에 영향을 주는 주요 인자를 선별하는 연구(2017. Kanishi, T. C. et al.)[14]가 진행되어 MAF에 영향을 주는 다양한 인자의 중요도를 확인했다. 그리고 기존의 MAF 방식에 자석을 틀 반대편에 추가하여 연마력을 높이는 방법(2008. Kwak, J. S et al.)[8], MAF시스템에 X, Z 축방향 진동을 부여해 표면의 특성을 분석하는 연구(2004, Shinmura et al.)[15], 초음파 적용 등 MAF에 다양한 요소를 추가하여 MAF의 성능을 높이는 연구가 진행중이다. 또 디버링에 MAF를 적용(2004. Shinmura et al.)[16], 웨이퍼에 적용(2009, Yamaguchi et al.)[17], 커브 표면에 적용(2016. Stein, M. et al.)[18], 티타늄 커팅툴에 MAF적용(2012. Yamaguchi, H. et al.)[19]

하는 연구 등 다양한 공작물에 MAF를 적용하는 연구가 진행되고 있다.

본 논문과 비슷한 MAF의 전기화학적 하이브리드 가공 사례로 첫 번째 방식의 MAF에 ECM을 적용한 연구(2014. Liu et al.)[20]가 있다. 이 연구는 회전하는 자석에 EC전극을 일체화시켜 동시에 같은 표면을 가공하는 방식으로 진행한 연구이다. 이 방법은 MAF만 진행한 표면에 비해 좋은 품질의 표면을 얻을 수 있지만, 스핀들 형태의 공구가 전해액 안에서 회전하기 때문에, 자기장 및 연마재가 불균일하게 분포되어 결과표면품질 균일화에 한계가 있다. 본 연구와 차이점은 MAF 형태가 다르고, 본 연구는 강산을 이용하여 전기화학적 가공하기 때문에 전체 가공에서 전기화학적 가공의 비중이 큰 점이 다르다고 볼 수 있다.

두 번째 방식의 MAF 연구는 파이프, 실린더 등 내부가공에 대한 연구(1995. Shinmura & Yamaguchi)[21]로 시작되었다. 첫 번째 MAF방식과 마찬가지로  $F_n$ 과  $F_c$ 에 대한 이론적 연구가 지속진행되었으며, 공작물에 자력분포 시뮬레이션 연구(2005. Jayswal, S. C. et al.)[22], 입자에 따른 MAF 시뮬레이션(2018. Li, W et al.)[23]등 최근에도 MAF 내부가공 메커니즘 분석이 진행되고 있다. MAF에 영향을 미치는 인자에 대한 실험적 연구로서 내부가공시 자기입자만 가지고 진행한 연마와, 자기입자 연마입자를 동시에 사용한 표면의 차이, 자기입자 크기에 따른 연마입자 최적화에 대한 연구(2018. Wang, R. et al.)[24], 스테인레스 강 튜브에 MAF내부가공 특성 분석(2004. Shinmura and Yamaguchi)[25], MAF의 습식가공과 건식가공비교, 연마재와 윤활제에 따른 연마력 비교[26], 자석 극 배열에 따른 연마정도 분석(2012. Yoon, Sung, et al)[27] 고속 RPM에서 내부가공 특성(2012. Kang, J. et al.)[28], ANOVA분석을 통해 다양한 가공영향인자의 중요도를 파악하는 연구 등 MAF에 영향을 미치는 인자에 대한 연구가 진행되고 있다. 또 MAF 내부가공의 성능을 높이기 위해 진동을 추가하는 연구[29], 초음파를 추가하는 연구 등 MAF의 성능을 높이기 위한 다양한 방안이 제시되고 있다. 또 구부러진 형상의 파이프 가공(2001. Yamaguchi. et el.)[30]에 대한 연구 등 다양한 형상 가공에 적용되고 있다. 최근에는 환경문제에 대응하기 위해 친환경적인 연마입자를 이용한 MAF도 연구되고 있다.(2019. Yin, C. et al.)[31]

두 번째 형태의 MAF로 전기화학적 용합을 시도한 연구로 MAF 내부가공과 ECM을 융합한 하이브리드 가공(EMAF)에 대한 연구(2015. Ridha, M. M. et al)[32]가 진행되었다. 이 연구는 질산나트륨 용액을 이용해 MAF와 ECM의 가공위치를 파이프 내부로 일치시키고, 동시에 가공해 결과를 분석했다. 결론은 MAF로 40분 가공한 표면거칠기를 MAF와 ECM을 동시에 가공하는 경우 8분 만에 도달하므로, 전체 가공시간을 확연히 줄였다. 본 연구와 차별점은 본 논문은 전해액이 황산, 인산을 혼합한 강산 전해액으로 진행하는 점, 이 연구에서 EMAF 8분의 세부 내용을 보면 MAF, ECM 동시가공 2분 진행하고 MAF 6분 진행하는 점으로 보았을 때, 이 연구는 MAF가 주요 공정이고, ECM은 보조하는 형태이다. 하지만 본 연구는 PECP에 큰 비중을 두고 있고, 목표로 하는 결과표면이 다르다. 또 본 논문의 이중공정 하이브리드 순차 가공의 경우 두 공정의 융합방식이 달라 가공 메커니즘이 다르다.

### 제3절 펄스 전기화학 폴리싱

#### 1. PECP 개요 및 원리

ECP(Electrochemical Polishing)는 전기화학적 반응(Electrochemical reaction)을 이용하여 표면을 가공하는 방법으로 공작물을 양극, 전극을 음극으로 하여 전기전원을 주면 전기화학 반응이 일어난다. 전기화학 반응은 전자의 산화(Oxidation), 환원(Reduction)을 뜻한다. 이 반응으로 양극 표면에서 금속용출반응이 일어나 표면의 부식 저항성, 표면거칠기를 낮추는 방법이다. 전기화학 폴리싱 가공 전 제품은 대부분 표면에 불순물과 변질 층을 동시에 지니고 있는데, 이는 부식의 핵이 되어 쉽게 부식을 일으키고 한번 시작된 부식은 변형 층이 없어도 계속 진행된다. 전기화학 폴리싱은 표면에 잔류하는 불순물과 변형층, 부식에 악영향을 미치는 물질을 제거하는데 효과적이다. 또 공작물에 전극이 직접 접촉하지 않고, 가공 정도를 전기적으로 조절할 수 있고, 전기가 통하면 금속 재료의 경도(Hardness), 기계적 성질에 구애받지 않고 가공이 가능한 장점이 있다. 또 가공의 시간이 빠르고, 부드러운 표면을 얻을 수 있다. 그리고 복잡한 형상에도 적용가능하고, 수소제거, 버(Burr)제거 되고, 표면에너지가 높아져 자가 세정효과가 뛰어나다.

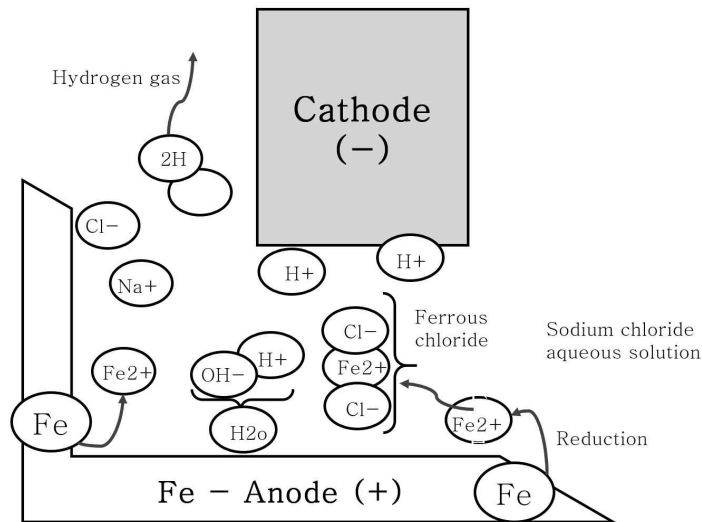


Fig. 1.9 Inter-polar reaction diagram



Fig. 1.9는 일반적인 ECP가공 Process의 개략도이다. ECP Process의 전기화학적 반응은 공작물(Anode)에서 일어나고, 공작물의 Fe원자가 환원반응을 거쳐 FeCl<sub>2</sub>(Ferrous chloride)로 변한다. Fe(OH)<sub>2</sub>(Ferrous hydroxide)가 액체 분해 과정에서 일시적으로 NaOH(Caustic soda)가 생성되고, 반응에서 생성된 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 슬러지(Sludge)로 배출된다. 전극(Cathode)는 전하를 받아 수소가스가 발생한다.[33]

전기화학 폴리싱은 양극에 금속의 전기화학적 용해가 일어나므로, ECP의 가공성은 원자량, 원자가, 가공시간 등에 의해 결정되고, 금속의 경도나, 기계적성질에 영향을 받지 않는다. 위의 ECP 가공인자와 패러데이법칙(Faraday's law)에 의해 전기화학 폴리싱 가공 시 제거되는 재료의 양은 식(12)로 정의된다.

$$m = \frac{AIT}{ZF} \tag{12}$$

A : Atomic weight

I : Current

t : Polishing time

z : Valency

F : Faraday's constant (965,000)

위의 식에 따라 시간당 재료제거율은 식 (13)와 같다.

$$m = \frac{AI}{zF} \tag{13}$$

특히  $\frac{AI}{z}$ 는 등가전기화학량(Electrochemical equivalent)로 칭하고, ECP의 중요 파라미터이다.

전류효율은 인가된 전류가 전체 전기화학적 반응에 사용되는 정도를 뜻하고, 전기화학 폴리싱 가공 시 전류효율에 영향을 미치는 인자는 가공 시 발생하는 가스, 에칭 현상, 산화전극과 환원전극의 간극, 전해액 등이 있다. 전기화학 폴리싱은 **Super passivation** 공정이며, 스테인레스 강과 같이 크롬 니켈 철 성분이 많은 금속의 경우 크롬 및 니켈은 표면에 잔류하고, 전기화학 반응시 산소와 결합하여 산화크롬 및 산화니켈 표면을 형성하게 된다, 이때 결합된 산화니켈 및 산화크롬은 재료의 내식성을 증가시키고 표면에 광택성을 증가시킨다. 안정화된 산화막은 금속의 용출을 방해하므로 전류의 효율이 떨어진다. 그러므로 전기화학 폴리싱은 일정한 가공시간이 지나면 공작물 표면의 금속 용출이 일어나지 않고, 표면 거칠기도 변화하지 않는다. 전기화학 폴리싱의 가공시간별 표면을 보면, 가공 초기에 금속의 조직이 보이기 시작하고, 이때 공작물의 표면에 금속이 용출되기 때문에 전류의 효율이 높아진다. ECP 진행 시 가공물 표면에는 소량의 산소가스, 전극에 수소가스가 발생한다. 표면에서 농도차에 의해 삼투압 현상이 일어나는데. 전류를 인가하면 공작물 표면의 요(凹) 부위에 안정적인 산화막이 덮여 보호되고, 철 부는 전기 흐름이 집중되며 선택적 용해가 이루어진다.

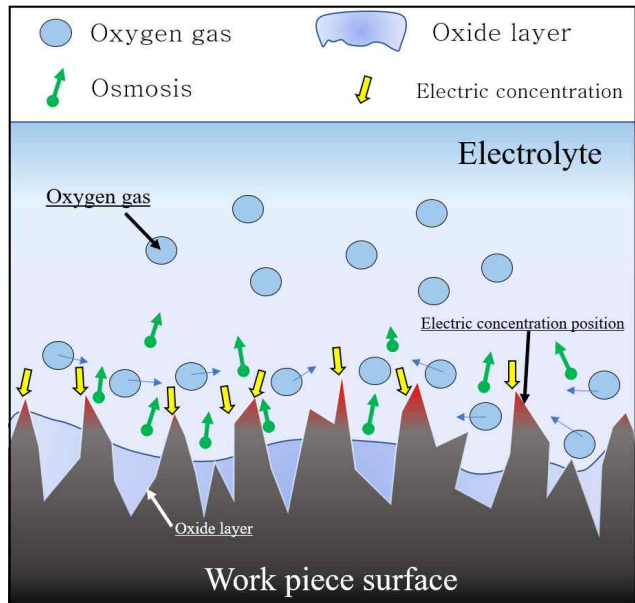


Fig. 1.10 Schematic illustration of electrochemical polishing mechanism

ECP에서 전압에 따른 전류밀도 곡선은 Fig. 1.11 [34]와 같다. 이를 통해 전기화학적 반응을 구분할 수 있다. A-B 구간은 금속표면에 금속학적 조직이 일어나는 에칭구간이며, B-C 구간은 금속표면에 불규칙적인 산화막이 형성되는 구간을 나타낸 것이다. C-D 구간은 전압이 올라가도 전류밀도의 변화가 적은 Plateau 구간이다. D-E 구간은 높은 전류를 통전할수록 짧은 시간동안 폴리싱 가공을 완성할 수 있으나, 산소가스가 다량으로 발생한다.

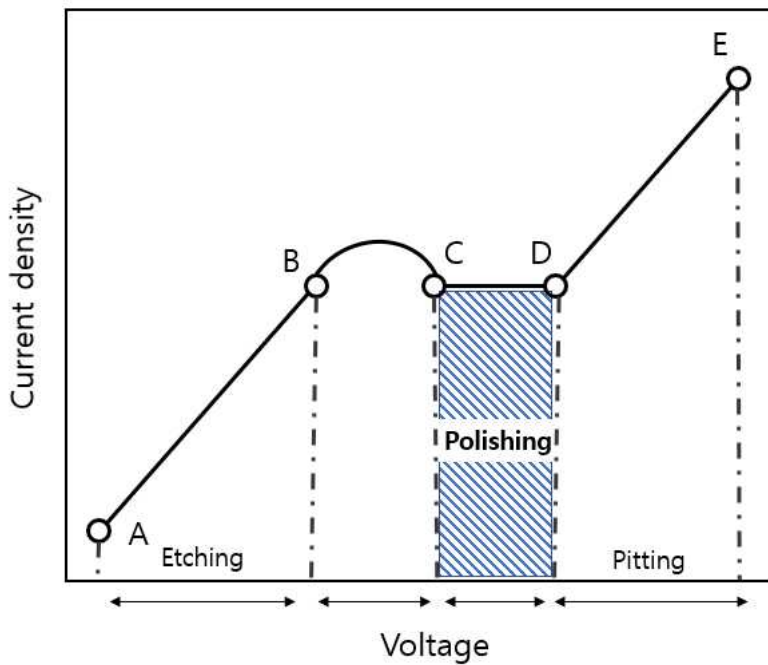
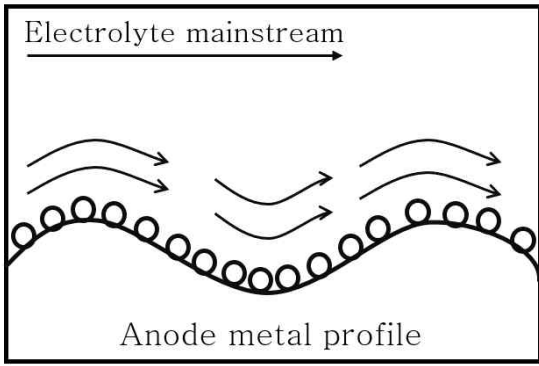
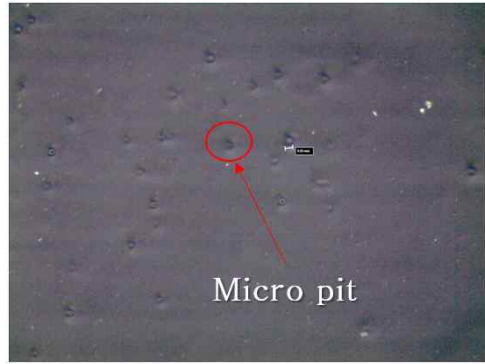


Fig. 1.11 Current density – voltage curve of electrochemical polishing



A. Schematic illustration of electrolyte flow from valley & peak of metal surface



B. A picture of micro-pit on ECP proceeded surface

Fig. 1.12 An schematic of electrolyte flow and micro-pit image

전기화학 폴리싱 가공시 산소가스는 공작물 표면 바깥쪽에서 발생하는데, 이 산소가스는 표면으로 나와 산화층 표면을 따라 전해액으로 이동하게 된다. 산소가스의 움직임으로 산화층의 표면 부분을 제거하여 돌출부를 선택적으로 용해하게 된다. 하지만 전류밀도가 높아지면 다량의 산소가스가 발생하며 Micro-pit가 생긴다. 이 Micro-pit를 제거하기 위해 가공물 표면에 일정한 유동을 일으켜 표면에 잔류하는 산소가스를 제거해야 한다. 산소가스를 제거하기 위해 전해액의 일정한 유속이 있어야 하지만 표면에 미세한 요철부 때문에 일정한 유속을 유지하기 어렵다.

ECP표면의 Micro-pit 문제를 해결하기 위해 전기전원을 펄스(Pulse)전원으로 바꾸어 표면에 잔류하는 산소가스를 줄이는 가공방식이 개발되었다. 이를 PECP(Pulse Electrochemical Polishing)이라고 부른다.[35] PECP는 가공 중 발생하는 Micro-pit의 발생을 줄이고, 낮은 재료제거율로 표면 품질을 높인다.

## 2. 전기화학 폴리싱의 연구 동향

전기화학반응을 이용한 기술은 1912년 독일정부가 은의 마무리 가공방식을 특허권으로 제기하며 처음 밝혀졌다.[36] 이후 1925년 구리의 전기화학 폴리싱을 시작으로 스테인레스 강 및 다양한 금속의 전기화학 폴리싱에 대한 연구가 진행되었다. 전기화학적 가공의 첫 번째 산업적인 적용은 Electrochemical engraving machine이 1958년 Anocut社에서 처음 시험되었고, 1962년 일본자동차 업계에서 상업화가 시작되었다. 이후로 터빈 블레이드의 ECP, 디버링(deburring)등에 적용되었다. 최근에는 바이오, 반도체 분야에 적용되고, 3D프린팅된 복잡한 금속 형상의 후처리 방식으로 ECP가 떠오르며 활발한 연구가 진행되고 있다. ECP의 성능을 높이기 위해 ECP에 진동이나 초음파(2003. Ruszaj, A. et al.)[37]를 추가하고 가공특성을 분석하는 등 다양한 시도가 이루어지고 있다. ECP의 단점을 보완하는 시도 중 하나로 전기전원을 펄스전원으로 입력하는 PECP가 제안(1993. Rajurkar, K. P. et al.)[35]되었고, 펄스 전류와 가공성의 관계가 수학적 모델을 통해 연구(2009. Park, J. W. and Lee, D. W.)[38]되었다. 이후 PECP의 각 인자에 의한 실험을 통해 최적변수를 찾는 연구(2012. Kim, Y. B. et al.)[39]등 PECP에 대해 다양한 연구가 진행되고 있다. 전기화학 공정은 전해액 내부에 공작물을 침지시켜야하고, 전극은 공작물에 맞게 제작되어야 하므로 공정에 어려움이 있다. 이에 대한 해결책으로 3d프린터로 전극모양을 출력하고, 전극을 코팅하여 ECP하는 연구도 진행되어 활용성을 높이고 있다.(2019. Kim, U. S. et al.)[40] 최근 환경오염 문제가 제기됨에 따라, 전해액을 최소로 사용하고, 흡입시켜 작업자의 안전성을 높이는 연구도 진행되고 있다(2017. Guo, C. et al)[41]

## 제4절 연구목표

금속 재료는 주위 환경에 따라 녹슬거나 수용액의 작용에 의해 용해되어 금속표면이 소모된다. 부식 현상을 개선하기 위해 내식성을 부여한 재료 중 대표적인 재료는 내식강인 스테인리스 스틸(Stainless steel)이다. 스테인리스 스틸은 다양한 분야에 활용되고, 본 연구의 가공방법인 ECP 또한 스테인리스 스틸의 수요가 증가하며 연구가 활발해졌다. 최근 산업의 고도화로 인해 요구되는 스테인리스 스틸의 품질이 중요해지고, 스테인리스 스틸의 표면 품질은 소재 품질의 주요 인자이다. 본 연구에서는 스테인리스 스틸의 종류 중 널리 사용되는 STS304의 표면 품질을 높이기 위해, 하이브리드 가공방식을 사용했다. 본 연구에서 목적으로 하는 높은 품질의 표면이란 평활하고(Smoothness), 평탄하며(Flattening), 표면거칠기(Surface roughness)가 낮다. 또 결점(Defects)이 없고, 전기화학적 반응으로 인한 Micro-pit가 없고, 높은 내식성을 가지고 광택이 나는 표면을 의미한다. 표면의 평활도는 AFM(Atomic Force Microscopy)으로 측정된 단면선도를 통해 요철(凹凸)의 존재 유무로 확인할 수 있다. 표면의 평탄도는 AFM으로 측정된 표면의 Rz값으로 판단할 수 있고, 표면거칠기는 일반적으로 사용하는 AFM 측정값인 Ra값으로 판단한다. Ra값은 10nm이하 Rz는 50nm이하의 값을 목표로 한다. 표면의 결점은 CCD카메라 화면에서 관찰되는 직경 5 $\mu$ m이상의 비정형 형태의 흠을 의미하고, 이미지 분석 프로그램을 이용해 정해진 크기에 결점의 개수를 파악하여 상대적으로 비교했다. 전기화학적 반응으로 인한 Micro-pit는 AFM 측정 표면에 5 $\mu$ m 이하 원 형태의 Pit를 의미하고 본 연구에서는 AFM 측정표면에 Micro-pit가 발생하는지, 제거되는지 여부만 확인했다. 내식성 여부는 이전 연구에서 PECP를 진행하면 표면의 Ni과 Cr이 산화되며 광택을 나타내고, 내식성을 가지는 것을 확인되었다.[45] 따라서 가공표면의 광택 여부를 지표로 사용하였다. 또 공정의 수를 줄여, 총 가공시간을 줄이는 목적으로 전기화학적 가공인 PECP와 기계적 가공인 MAF를 융합한 두 가지 하이브리드 가공의 형태로 가공하고, 가공특성을 연구하였다.

Symbols for element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Composition (%)	0.02	0.62	0.8	0.03	0.02	12.19	17.8	68.52

Table. 1.1 Chemical composition of STS 304 (%)

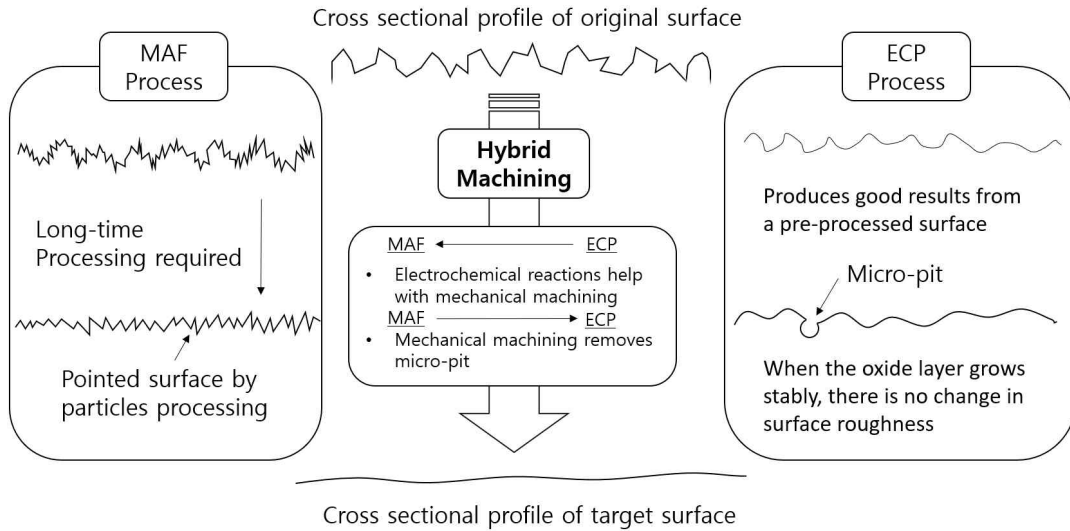


Fig. 1.13 Anticipated schematic of synergy effect of MAF, PECP hybrid machining

Fig. 1.13은 각 가공방식의 표면 단면선도와 하이브리드 가공시 예상되는 효과와 목표표면을 개략도로 나타낸 것이다. 전기화학가공은 금속의 표면을 용융시켜 기계적 가공에 도움을 주기 때문에 하이브리드 가공에 자주 사용된다. 하이브리드 가공의 연구 사례(1990. Omori, H., & Nakagawa, T.)[42]를 보면 표면에 전기화학적 반응을 하면서 연삭가공을 진행하여 연삭이 쉽게 이루어지도록 한다. 이 연구처럼 본 연구에서도 전기화학 반응과 기계적 가공을 융합하기 위해, 제어가 쉽고 장치가 단순한 MAF와 전기화학적 연마방식인 ECP의 단점을 보완하는 PECP를 선택하여 융합을 시도했다. 두 가공방식의 공통점으로는 다양한 형상에 적용가능하고 표면거칠기를 낮추는 공통점을 가지고 있고, ECP는 표면 평활화(Smoothness)는 효율이 높으나, 넓은 범위의 파상도(Waviness)의 평탄화에는 한계가 있다. 하지만 MAF는 ECP보다 넓은 범위의 파상도를 줄여 평탄화한다. 또 MAF에서 자기입자가 공작물에 미치는 힘이 표면거칠기의 주요 가공인자가 되는데 전기화학적 가공된 표면은 기계적가공에 도움을 주기 때문에 더 적은 힘으로도 높은 MAF 효율을 볼 수 있을것으로 예상된다. 이는 MAF로 내부가공하는 경우 자기입자와 자석사이 간격이 멀어지면 인력이 낮아져 가공물의 두께에 한계가 생기는데, 두 공정 융합으로 전기화학적 반응이 공작물의 한계 두께를 늘리는데 도움이 될 수 있다.

MAF, PECP 융합의 첫 번째 순서는 하이브리드 가공시 변수로 작용시킬 인자와, 고정시킬 인자를 구분하는 것이다. 먼저 각 공정을 단독 가공하여 STS304표면을 분석한다. 본 연구의 MAF의 형태는 두 번째 MAF 가공방식에 가공물의 회전 대신 자석에 진동을 주는 방식을 사용하므로, 이에 대한 기초 시뮬레이션과 MAF 가공특성에 대한 실험이 먼저 진행되고, PECP는 기존 연구방식과 같으므로 참고 논문의 결과가 현재 동일 적용되는지 확인 실험을 진행하고 PECP 진행시간에 따른 표면 변화를 관찰한다. 이후 MAF 진행 이후 PECP를 진행하는 실험과, PECP이후 MAF를 진행하는 교차가공을 하고, 가공기초특성을 분석한다. 본 연구의 첫 번째 순서의 실험장치인 MAF 단독 가공장치 및 시스템, PECP 단독 가공장치 및 시스템은 2장에 기술하고, 가공특성 분석은 3장에 기술한다. 본 연구의 두 번째 순서는 MAF와 PECP를 이중공정 동시 하이브리드 형태로 융합하고, 가공에 영향을 주는 변수에 따른 가공특성을 분석하고 내용은 4장에 기술한다. 5장에서는 이중공정 동시 하이브리드 가공에서 나타난 가공특성을 고려하여 이중공정 순차 하이브리드 형태로 융합하고, 실험장치의 특징에 의해 바뀌는 MAF, PECP 특성을 분석하고, 가공변수에 따른 가공특성을 분석한다. Fig. 1.14는 본 연구의 순서를 나타낸 개략도다.

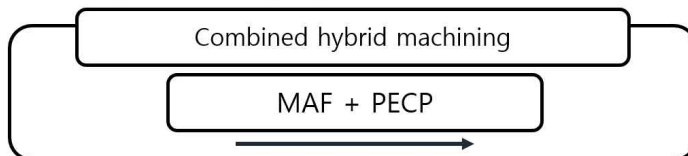
1. Analysis of each process machining characteristics



2. Analysis of machining characteristics according to process sequence



3. Analysis of Combined hybrid machining characteristics according to machining impact factor



4. Analysis of Controlled application of process mechanisms characteristics according to machining impact factor

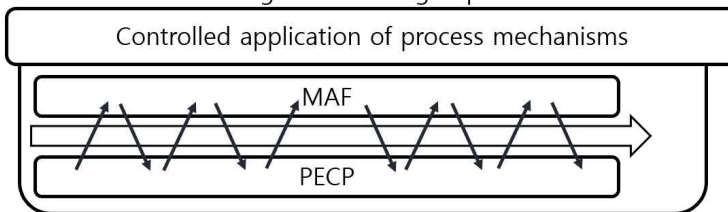


Fig. 1.14 The process of proceeding this study



## 제2장 MAF, PECP 실험장치 및 시스템

### 제1절 MAF 실험장치 및 시스템

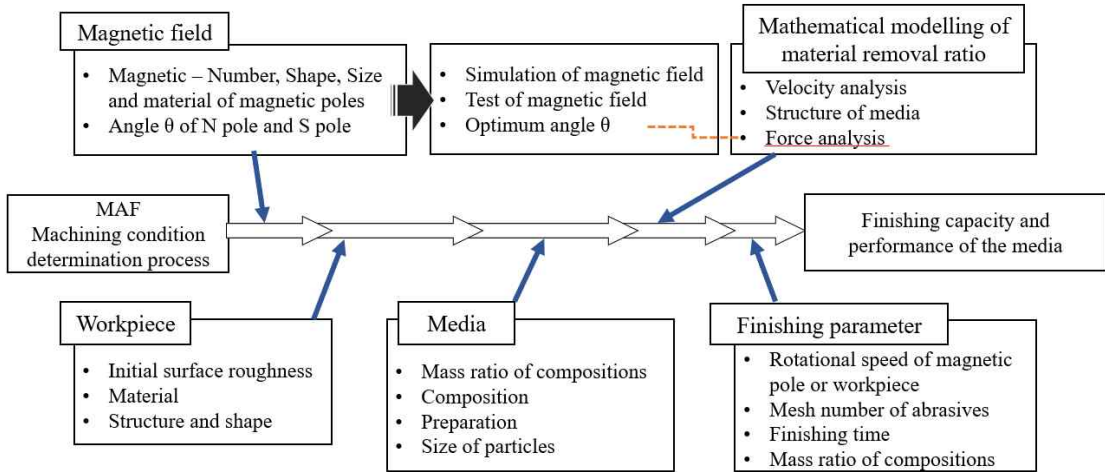


Fig. 2.1 MAF machining condition determination process

Fig. 2.1의 개략도는 MAF 공정조건 설계 시 가공영향인자 선정 프로세스[43]를 나타낸 것이다. 위 개략도는 자기입자가공에서 연구된 가공영향 인자들을 포괄하고 있다. 이 변수들은 크게 자기장 관련 변수(Magnetic field), 대상 공작물(Workpiece), 자기입자 및 연마입자, 슬러리(Media), 가공 조건(Finishing parameter), 재료 제거율(Material removal ratio)의 범주로 나뉘어있다. 본 논문의 MAF 또한 위의 개략도의 흐름에 따라 가공변수를 결정하고 실험했다. 자기장 관련된 조건 설정에서, 본 연구는 평판에 가공을 진행하기 때문에 자석의 개수는 1개,  $10 \times 15 \times 50 \text{mm}^3$ 의 직사각형의 막대자석, 자석의 재질은 자력(T)이 강하고 저렴한 네오디움(Neodyum)재질의 자석을 사용했다, 네오디움 자석은 녹에 취약해서 니켈(Ni)로 도금하여 사용하고, 온도 계수가 낮아 고온에서 자성이 약해지는 것이 단점이다. 자석간의 각도는 원통형 공작물의 내부가공에 사용되는 인자이므로 제외한다. 자기력 시뮬레이션은 길버트모델을 활용한 자석 간격에 따른 자기력변화 시뮬레이션 연구[8]를 참고하였다. 자기력 테스트는 Magnetic meter(MG-3002)로 측정하여, 막대자석의 자기력이 0.3T임을 확인했다.

공정변수 결정 플로우 차트에서 공작물 재질은 STS 304로 정했고, 가공전 표면의 거칠기 관찰 및 측정 내용은 3장 1절 1에서 소개한다. 공작물은 두께는 0.4mm의 평판으로 진행하였고, 크기는 하이브리드 가공의 방식에 따라 다르게 진행하였다.

Media의 범주에서 자기입자와 연마입자, 윤활제의 비율은 전기화학가공과 자기입자 가공을 융합한 연구[32]를 참고하여 자기입자와 연마입자를 7:1로 혼합하고 윤활제를 0.5ml 혼합하여 사용하였다. 자기입자의 크기에 따른 연마정도를 나타내는 연구결과[21]에서 75 $\mu$ m에서 150 $\mu$ m 사이의 크기입자를 사용한 조건에서 결과표면이 좋게 나왔다. 또 전기화학적 가공이 기계적가공에 도움을 주기 때문에 자기입자는 기존에 최적 크기로 알려진 Iron Powder 75 $\mu$ m와 한 단계 작은 크기의 45 $\mu$ m 두 가지를 준비하였고, 가공조건에 따라 크기를 다르게 하여 슬러리를 준비하였다. 하이브리드 가공에서 가공 환경에 강산이 존재하기 때문에 STS304 Powder를 추가로 준비하였고, 크기는 100+34 $\mu$ m이다. 연마입자는 WA(White alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 0.5 $\mu$ m, 1.5 $\mu$ m, 3~5 $\mu$ m 총 4가지 크기의 입자를 준비하여 가공조건에 따라 사용하였다. Lubricant는 Water soluble lubricant를 사용하였다. 1회 MAF 가공 시 사용되는 슬러리의 총량은 0.15g을 사용하였다. MAF의 수학적 모델링 및 재료제거율에 대한 내용은 1장 2절 2와 3장 1절 2에서 다루었다. 전체 가공시간은 하이브리드 방식에 따라 다르게 진행하였다. 공작물의 회전속도는 이중 공정 순차 하이브리드 가공에 관련된 인자이기 때문에 5장 2절 1에서 다룬다.

본 연구에서 사용되는 MAF 실험장치 개략도를 Fig. 2.2에 나타내었다. 본 연구의 MAF는 슬러리를 자석에 직접 부착하여 가공하는 방식이 아닌, 슬러리와 자석사이에 공작물을 위치시켜 가공하는 방식이다. 기존 연구에서 원통형의 공작물을 회전시켜 가공하는 방식과 다르게 본 연구에서는 평판에 가공을 진행하기 때문에, 진동장치를 자석에 부착하고, 좌우로 병진운동하여, 공작물을 가공한다. 자석위에 STS304 평판을 위치시키고 고정시킨다. 그리고 자기입자와 연마입자, Lubricant를 섞어 준비한 슬러리를 공작물 위에 위치시킨다. 가공조건에 따라 진동장치를 동작시킨다. 가공이 끝나고 공작물을 세척하고, 현미경으로 표면을 관찰하고, AFM으로 표면을 측정한다.

Fig. 2.3에 나타낸 진동장치는 Bruel & Kjaer社의 Power amplifier Type 2712, Sine generator Type 1051, Vibration exciter Type 4808을 사용하였으며, 진동주파수 범위는 0Hz~100hz이고, 최대 진폭이 1.27cm으로 직선 왕복 운동한다.

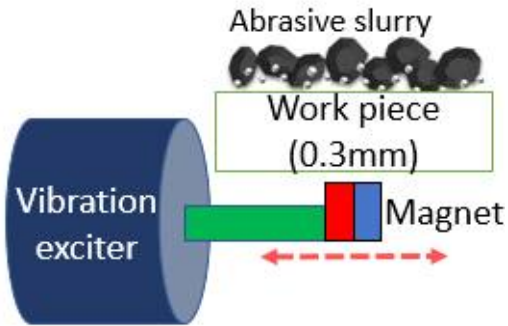


Fig. 2.2 Schematic illustration of MAF experimental setup



A. Power amplifier Type 2712, Sine generator Type 1051



B. Vibration exciter

Fig. 2.3 A picture of vibration-related devices

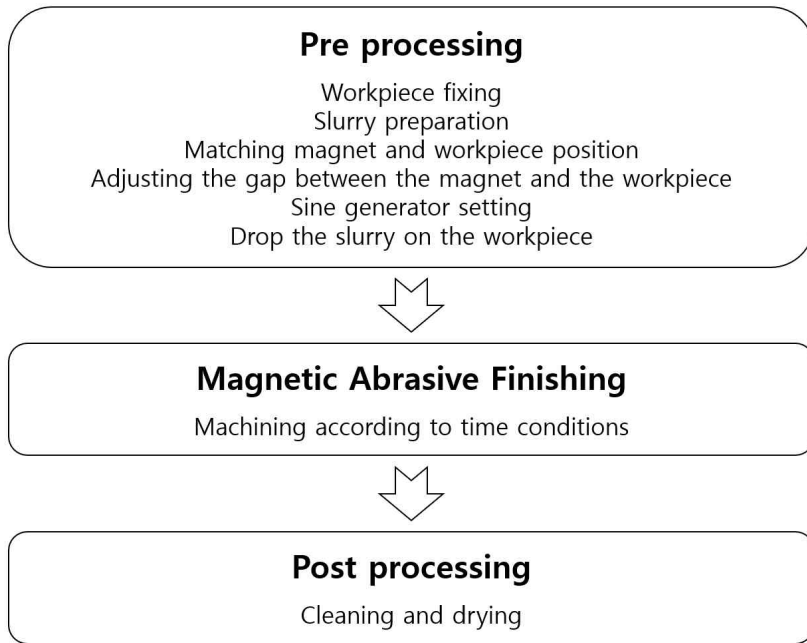


Fig. 2.4 Processes of magnetic abrasive finishing

Fig. 2.4는 MAF 공정을 나타낸 개략도이다. MAF의 가공 공정은 사전작업, 가공, 후작업 총 3개의 단계로 이루어진다. 사전작업은 공작물을 고정하고, 자기입자와 연마입자, 윤활제를 혼합하여 슬러리를 만들어 준비한다. 그리고 가진기에 연결한 자석과 공작물을 세로 방향으로 일치시키고, 자석과 공작물 사이 간격을 조절한다. 간격조절 후 슬러리를 공작물 위에 올리고 Sine generator의 Hz조건을 실험조건에 맞게 맞추고 준비를 마친다. 가공단계에서는 Power amplifier의 전원을 인가하여 가진기 진동을 시작한다. 조건 시간 동안 가동한다. 가공이 끝나면 아세톤과 D.I water로 순차 세척하고 건조하는 것으로 전체 공정이 끝난다.

## 제2절 PECP 실험장치 및 시스템

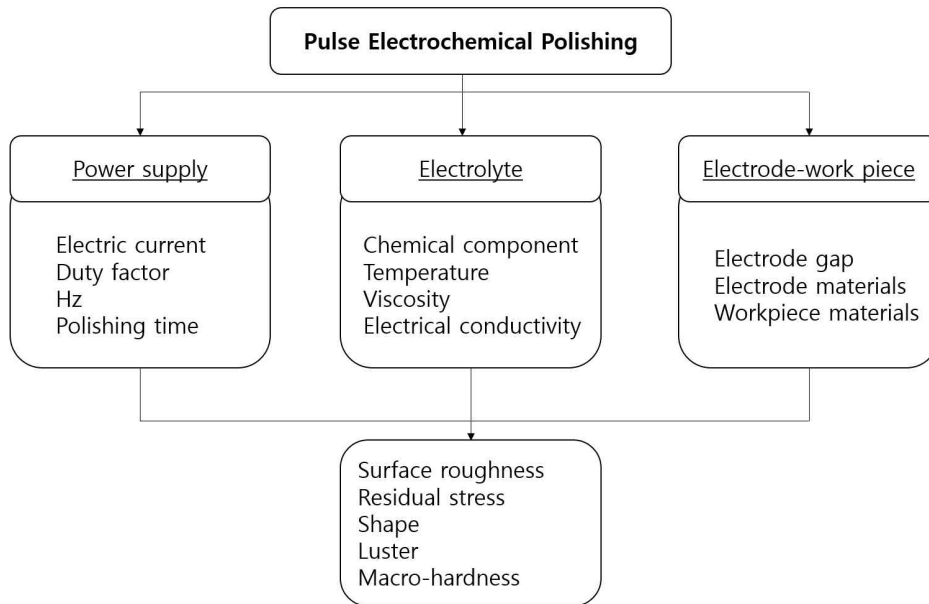


Fig. 2.5 Diagram of factors affecting PECP processing

Fig. 2.5은 PECP의 가공에 영향을 주는 인자와 결과 인자들을 나타낸 개략도이다. 먼저 전기적인 조건에서 Current는 목표 공작물의 크기에 따른 전류밀도(Current density, A/cm<sup>2</sup>)를 계산하여 0.4~1.0A/cm<sup>2</sup>사이 값에서 조건에 따라 다르게 실험했다. Duty factor는 펄스폭  $\tau$ 을 반복주기 T로 나눈 값으로, 충격계수로 부른다. 기존의 PECP 실험을 참고하여 Duty factor는 최적조건인 50으로 진행했다.[44] Hz는 PECP최적 조건인 425Hz로 진행하였다[45]. 전체 Polishing 시간은 기존 연구에서 180초가 넘어가면 산화층이 안정되어 표면의 변화가 미미하기 때문에 180초를 PECP 기준시간으로 정하고, 실험에 따라 더하거나 빼서 진행하였다. 전해액은 5.9 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 2.4 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O를 혼합하여 사용하였고, 전해액 온도는 50~70도에서 진행하였다. 전극과 공작물의 간격은 관련 연구를 참고하여 5mm에서 진행했다.[46] 전극은 구리 평판을 공작물의 크기에 맞게 잘라 사용하였다.

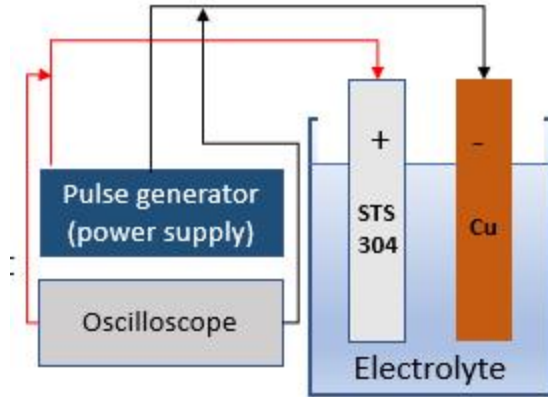
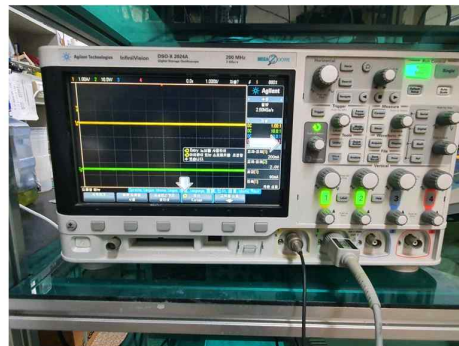


Fig. 2.6 PECP experimental setup

PECP의 일반적인 실험장치 구성은 Fig. 2.6와 같다. 전해액을 전해액조에 넣고, 공작물과 전극사이의 간격을 고정시킨뒤 전해액에 침지 시킨다. 파워서플라이에서 전원이 공급되어야 하기때문에, 전원을 연결할 공간은 전해액 밖으로 노출시켜야 한다. 공작물과 전극에 전원선을 연결하고, 전원선에 오실로스코프의 프로브를 물려 가공 중 전기적 조건 변화를 확인한다. 펄스 전기화학 폴리싱의 전원장치는 최대 50V, 12A 성능을 내고, 펄스관련 컨디션 조절 Dutyfactor나 Hz 조절이 가능한 파워서플라이를 사용하였다. PECP진행중 전압 및 전류 측정은 오실로스코프에 Tektronix社의 CT-2 프로브를 파워선에 연결하고, 전압은 Agilent社의 전압 프로브를 파워선에 연결해 실시간 전류를 모니터링하면서 폴리싱을 진행했다. Fig. 2.7은 실험에 사용된 파워서플라이와 오실로스코프 사진이다.



A. Power supply



B. Oscilloscope

Fig. 2.7 A picture of power supply and oscilloscope

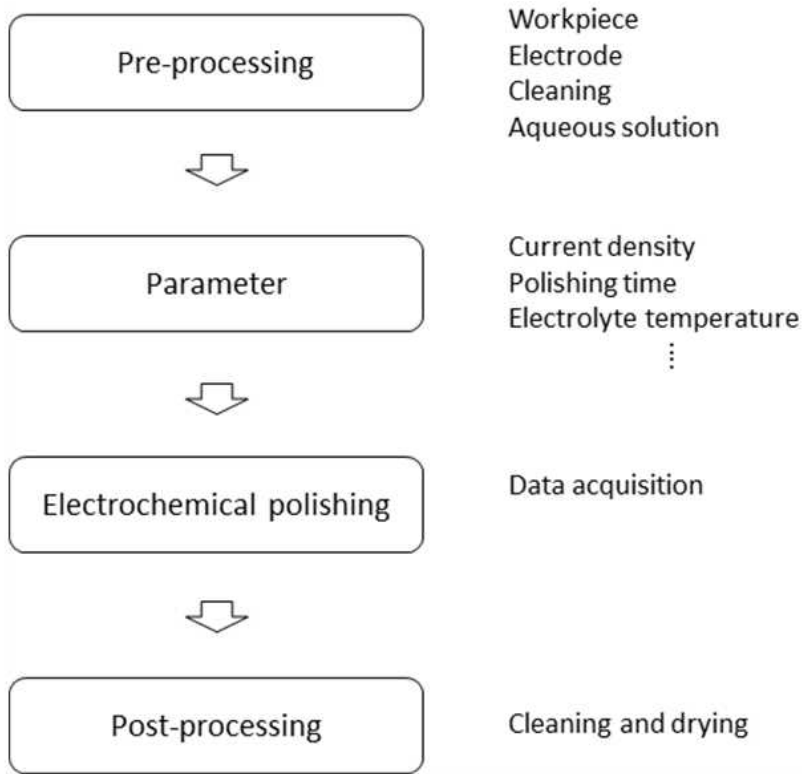


Fig. 2.8 PECP process

PECP의 공정은 Fig. 2.8에 나타내었다. PECP는 공작물의 가공 전 표면상태에 따라 결과가 좌우되기 때문에 불순물을 제거하는 전처리 공정이 필요하다. 먼저 공작물을 Acetone과 D.I Water로 순차 세척하고 건조한다. 공작물에 맞게 제작한 환원전극과 공작물을 가공 시 간극이 변형되지 않도록 제작된 지그(Jig)에 고정시킨다. 그리고 공작물의 재질에 맞는 전해액을 준비한다. 전해액은 유독성 강산이므로 안전장비의 착용이 필수적이고, 가공진행 중 가스가 발생하기 때문에 환풍 장치가 필요하다. 전해액을 전해액조에 담고, 공작물과 전극을 지그에 고정하고 전해액조에 침지시킨다. 이후 전기적 인자(Pulse Hz, Duty factor등)를 설정한 파워서플라이에서 공작물에 (+) 전원을 연결하고, 환원전극에 (-) 전원을 연결한다. 전기적 조건을 설정하고, 가공시간을 파워서플라이에 설정하는 것까지 준비과정이다. 전기적 전원을 인가하면 PECP가 진행되고, PECP를 진행하는 동안 오실로스코프로 전류밀도 및 전압을 실시간으로 확인한다. 가공시간이 끝나면 공작물을 지그에서 제거하고 아세톤(Acetone)과 D.I Water로 세척하여 표면의 산성분을 제거하고, 건조시키는 것으로 PECP 공정이 끝난다.

### 제3절 측정장치 소개



A. Optical microscope

B. Atomic force microscope

C. CCD Camera monitor

Fig. 2.9 A picture of observation, measuring device

가공된 표면을 관찰 및 측정하는 장비는 현미경과, AFM이고, 해당 장치의 사진을 Fig. 2.9에 나타내었다. 현미경은 x13.5~x90 배율로 관찰하고, 가공된 표면은 스테이지에 올려 관찰하고, 큰 범위에서 표면의 품질(Defects, Pit)을 확인하였다. 이후 가공된 시편을 AFM을 통해 측정했다. AFM 측정 방법은 Table에 올려 초점을 맞추고 먼저 CCD카메라로 표면을 확인한다. 여기서 AFM-Contact cantilever로 측정해도 될 정도(큰 Pit가 CCD카메라에 10개 이하로 관찰되고, Pit를 피해서 측정가능한 경우)로 표면에 Pit가 적고, 결점이 없는 경우 AFM의 CPM-36 Cantilever를 통해 접촉식으로 측정하였다. 측정 조건은  $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 을 기준 범위로 정하고 Scan rate 0.1~0.3Hz로 측정하였다. AFM으로 측정한 표면은 XEI프로그램을 통해 분석하였으며, AFM으로 접촉식 측정하는 경우 표면에 Pit가 거의 없다고 판단되기 때문에, Pit가 없는 측정 영역이 전체 표면을 대표한다고 생각된다. 때문에 AFM측정 표면에서 Pit를 제외한 표면을 가로지르는 선을 기준으로 Ra, Rz값을 확인하고, 단면선도를 통해 요철(凹凸)제거 여부와 국부적 표면의 평활도를 확인했다. AFM으로 측정된 값 중 Ra, Rz, Sa를 표면의 품질을 나타내는 지표로 분석하였으며, Ra는 중심선 평균 거칠기로 단면곡선을 중심선을 기준으로 올려 중심선 위쪽 그래프를 적분한 값을 샘플구간으로 나눈 수치이다. 국제적으로 가장 많이 사용되는 표시법이고, 일반적인 표면거칠기 판단기준으로 사용한다. 하지만 특정 산이나, 골이 있어도 값에 큰 영향을 주지 못하기 때문에, 추가적으로 Rz를 평탄도



의 지표로 사용하여 표면을 판단한다. Rz는 단면곡선에서 높은 쪽 5번째 산 끝과 낮은 쪽 5번째 골 사이에 2개 평행선 간격을 측정하여 표시한 것이다. Sa는 전체 표면의 평균 거칠기이다. 또 관찰 표면 및 측정표면은 MAF진행된 영역의 중심에 마커로 표시하고, 표시된 영역의 12시, 3시, 6시, 9시 방향을 관찰, 측정하고, 가공표면의 전반적인 경향을 나타내는 표면을 도시하였다. PECP결과 표면의 경우 침지된 면에서 10mm깊이의 중심에 마커로 표시하고 위와 같은 방식으로 측정했다. 4장, 5장의 하이브리드 가공의 경우 MAF와 PECP가 겹치는 가공영역에서 중심을 측정했고 이후 측정은 위와 같은 방식으로 진행했다. 관찰 및 측정위치에 관한 내용은 각 장에 세부적으로 기술한다.

### 제3장 MAF, PECP 교차가공 기초특성

#### 제1절 MAF, PECP 교차가공 개요 및 사전실험

MAF와 PECP 교차가공은 각 가공이 상호 미치는 영향을 확인하기 위한 실험이다. 따라서 MAF→PECP, PECP→MAF의 두 가지 순서로 가공을 진행하고, 비교 분석한다. 순차 가공 전 대조군에 대한 분석이 먼저 필요하다. 첫 번째 대조군은 가공 전 STS304 평판의 표면이고, 제1절 1에서 다룬다. 두 번째 대조군은 STS304평판에 MAF만 진행한 표면, 세 번째 대조군은 STS304 평판에 PECP만 진행한 표면이다. 여기서 MAF는 기존의 MAF에서 변형된 형태를 취하므로 기초해석과 변수에 따른 가공특성 분석이 필요하다. 이는 2절에서 다룬다. 세 번째 대조군은 PECP 가공시간과 전류밀도에 따른 가공특성을 분석하고 나머지 변수는 기존 연구논문을 참고하여 통제한다. 이는 제1절 2에서 다룬다. 위의 세 종류의 대조군 표면을 분석하고 두 종류의 교차가공의 표면과 비교한다. Fig. 3.1은 교차가공 기초특성 분석 개략도를 나타내었다.

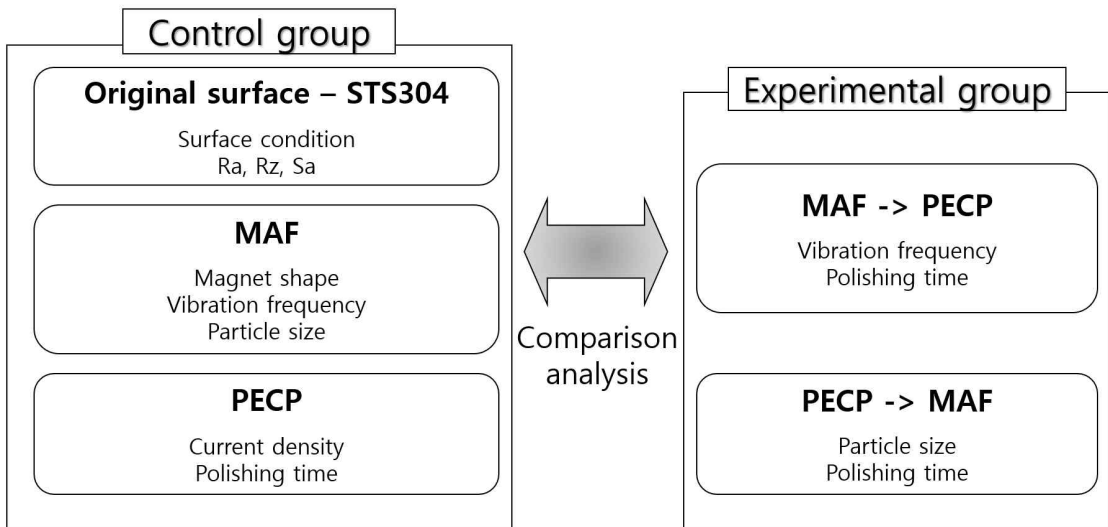


Fig. 3.1 Schematic diagram of sequential processing experiment

## 1. STS304 표면 측정

Fig. 3.2, 3.3은 STS304의 가공 전 표면을 CCD 카메라와, AFM 측정을 통해 가공 전  $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$  크기 측정표면 및 표면의 Ra, Rz, Sa 값을 측정하고, 표면의 단면선도를 나타낸 것이다.

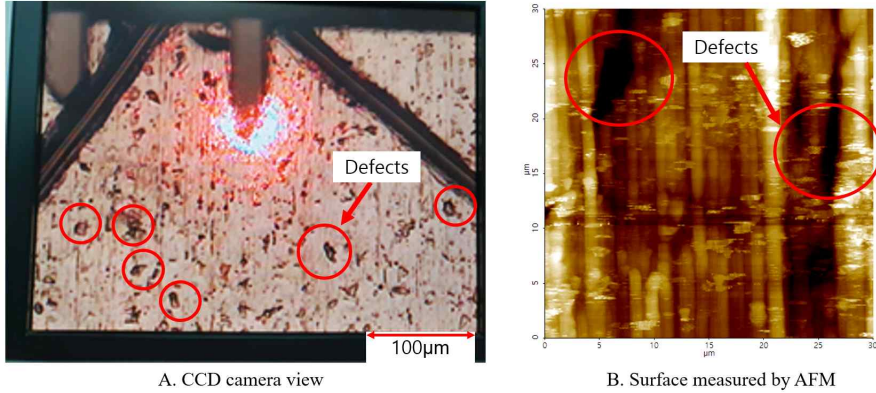


Fig. 3.2 STS304 Surface

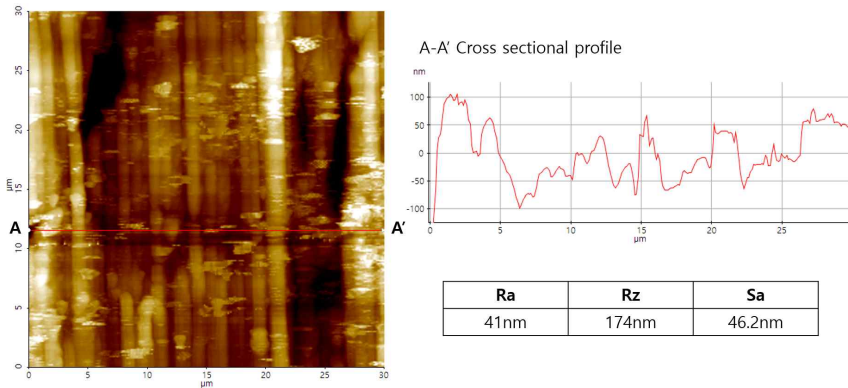


Fig. 3.3 AFM image of STS304 surface

Fig. 3.2 A를 보면 표면에 큰 결점이 많이 관찰되고, B에서 역시 표면 결점이 보인다. A를 보면 소재의 가공방향으로 선이 보이고, 이는 B에서 더 명확하게 보인다. Fig. 3.3 A-A' 단면선도를 보면  $-100\text{nm}$ 에서  $100\text{nm}$ 사이에서  $2\sim 3\mu\text{m}$  크기의 요(凹), 철(凸)의 형상이 측정된다. 표면의 Ra값은  $41\text{nm}$ 가 측정되었고, Rz값은  $174\text{nm}$ , Sa는  $46\text{nm}$ 이다. 이후 가공 후 표면에 일반적 표면을 측정하기 때문에 결점을 제외하고 측정했고, 결점은 더 넓은 범위에서 이미지 분석을 통해 따로 분석했다.

## 2. MAF 가공특성

### 가. 진동 시 자석 모양에 따른 슬러리의 거동특성

본연구의 MAF가공장치의 형태는 파이프 내부가공의 방식과 흡사하고, 파이프형태의 공작물을 회전시키는 방식 대신 평판형태의 공작물을 고정시키고 틀에 진동을 주어 가공했다. 이 방식의 주 요소는 진동 시 표면이 충분히 가공될 수 있는 슬러리의 거동이다. 자석을 평판에 어떤 형태로 붙이느냐에 따라 슬러리의 배열이 다르고, 진동을 주었을 때 슬러리의 탈락 정도가 다르다. Fig. 3.4는 자석형태에 따른 슬러리의 분포형태를 나타낸 것이다. Fig. 3.5는 자기장의 힘의 분포와 진동방향에 따른 슬러리의 탈락 여부를 보여주는 개략도이다.

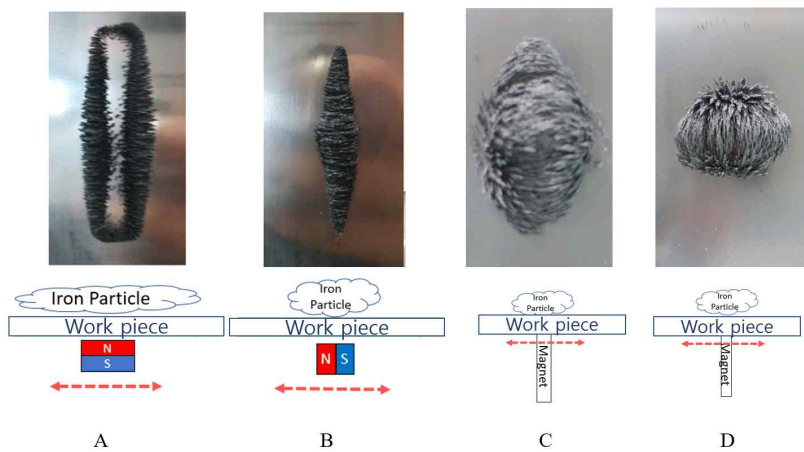
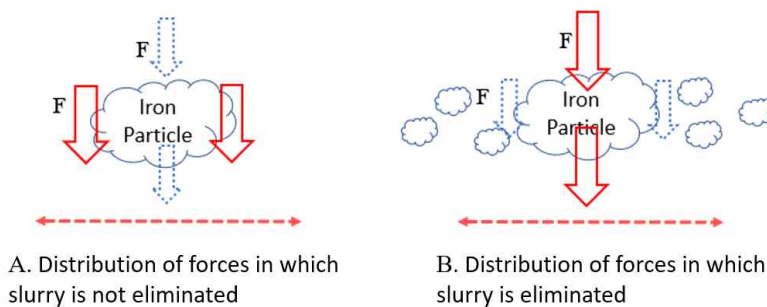


Fig. 3.4 Distribution of slurry according to magnetic form



A. Distribution of forces in which slurry is not eliminated

B. Distribution of forces in which slurry is eliminated

Fig. 3.5 Elimination of slurry according to magnetic force form

먼저 MAF 파이프 내부가공에 사용된 자석의 형태는 Fig. 3.4 C의 형태이다. 먼저 C와 D의 차이는 Fig. 3.5 의 A와 B와 같다. N극과 S극의 위치에 따라 A는 좌우에 자기력선이 밀집되고 B는 상하위치에 밀집된다. 이때 좌우로 진동을 가하면 A의 형태는 탈락되는 슬러리가 적지만 B의 경우는 슬러리가 많이 탈락된다. 이 결과를 바탕으로 보았을 때 진동 축 방향에 자석의 자기력선이 밀집되어야 슬러리의 탈락이 적으므로, C의 형태가 적절하다고 볼 수 있다. 또 Fig. 3.4의 A, B와 C, D의 형태를 비교해보면, C, D는 진동Hz가 높아질수록 슬러리가 탈락되는 현상을 보이는 반면 A, B는 안정적인 거동을 보인다. 여기서 A는 N극과 S극 인력이 집중되는 부위가 공작물의 아래쪽 자석 좌우에 위치하고, B는 N극과 S극의 인력이 집중되는 부위가 공작물 위쪽, 가운데에 집중되기 때문에 B가 진동Hz가 올라가도 상대적으로 안정적인 거동을 보인다. 따라서 본 논문의 MAF 실험은 B의 형태로 진행했다.

## 나. 시뮬레이션을 통한 자석의 자기장 분포 및 자기입자의 수직력 해석

본 연구에서 사용되는 MAF의 형태는 기존의 MAF와 다르기 때문에 자석의 자기장 분포와 자기입자가 표면에 가하는 수직력에 대한 기초적인 해석이 필요하다.

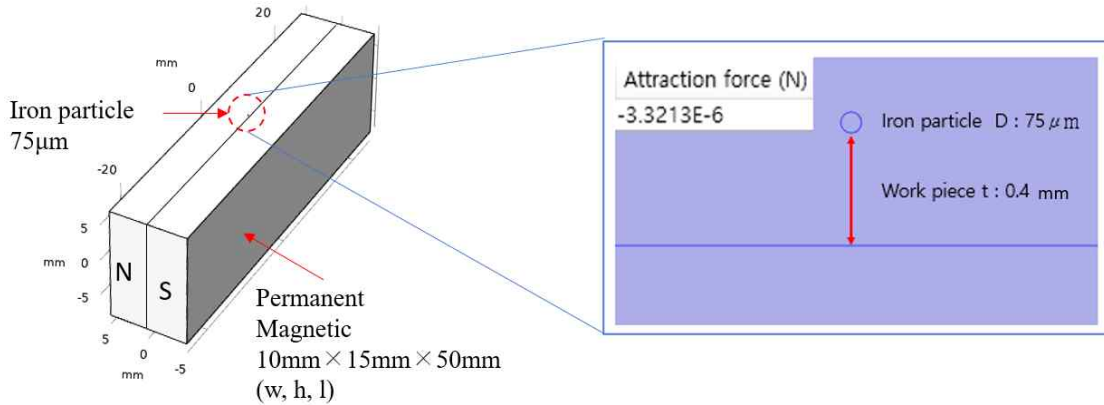


Fig. 3.6 Geometry setting

Geometry는 자석과 자기입자의 크기에 맞게 생성하고 자기입자의 위치는 자석으로부터 공작물의 두께(0.4mm)만큼 떨어진 곳에 위치시켰다. Geometry는 Fig. 3.6에 나타내었다. 자석의 재질은 Material library에서 Neodymium으로 설정하고, 자기입자는 Iron powder로 설정했다. 자석의 Remanent flux direction은 N과 S극이 배열된 Y축으로, Remanent flux density norm은 자석의 스펙에 따라 0.5T로 설정했다. 이 설정값으로 해석하여 Fig. 3.7 자석에서 공작물의 두께(0.4mm)만큼 위로 절단한 면의 자기장 세기와 자기력 분포를 확인했다. Fig. 3.7 A를 보면 자석의 폭인 10mm보다 2mm가량 크게 자기장이 분포되는 것을 확인할 수 있고, 자기력이 가장 높은 부분이 0.3T를 나타내기 때문에 2장 1절의 자석 자기력 측정값과 유사함을 확인할 수 있다. B를 보면 자석의 양 끝에서 자기력이 높은 것을 확인할 수 있고, 이는 제3장 1절 2. 가.에서 자석의 모양에 따른 자기입자의 분포형태와 일치함을 확인할 수 있다.

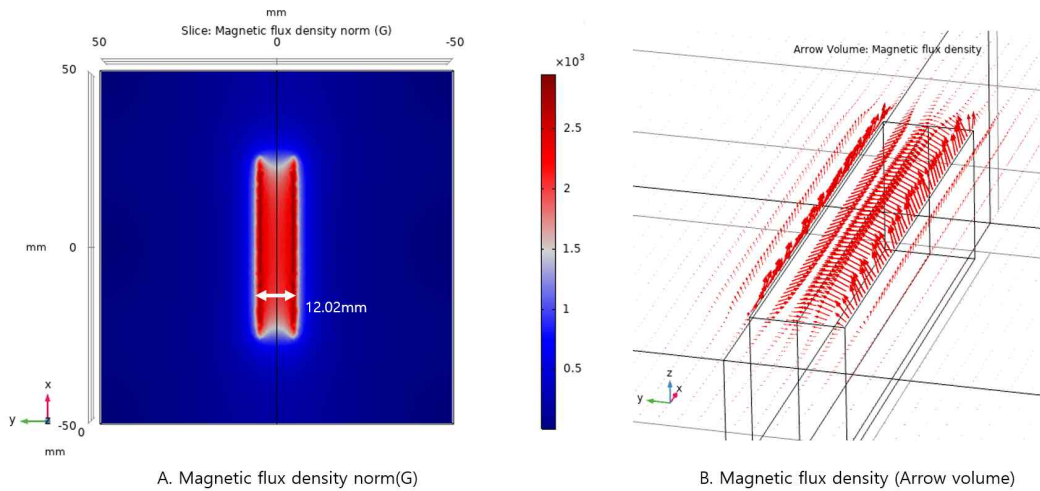


Fig. 3.7 Magnetic flux density analysis results

두 번째 해석을 위해 자석에서 공작물의 두께만큼 위에 위치시킨 자기입자에 Z축 방향으로 Force calculation 적용하여 계산한 결과  $F_n$ 은  $-3.3213E-6N$ 이 나왔다. 이 결과를  $F_{nm}$  자기입자의 전체 수직력이라고 정의하고, 자기입자에 붙어있는 연마입자가 소재 표면에 미치는 힘을 계산하기 위해 자기입자에 붙어있는 연마입자가 표면에 영향을 가할 수 있는 한계 각도를  $\theta$ 로 정한다. Fig. 3.8은 자기입자와 연마입자의 직경에 따라 한계 각도와 수직력 분산을 나타낸 개략도이다.

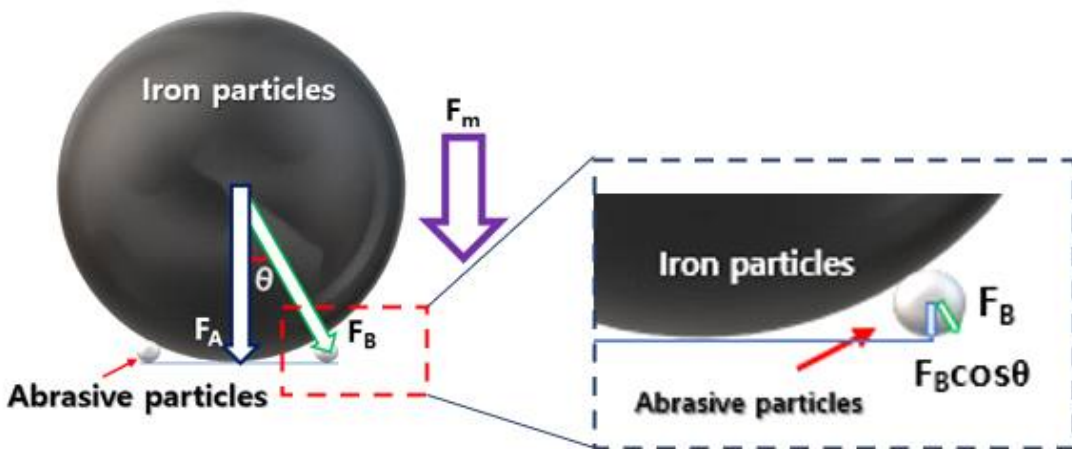


Fig. 3.8 Schematic diagram of vertical force variance of magnetic and abrasive particles

Fig. 3.8에 나타난 형태에 따라 자석이 자기입자를 당기는 전체 힘  $F_{nm}$ 은 자기입자가 표면에 가하는 힘  $F_A$ 와 표면에 영향을 미치는  $n$ 개의 연마입자가 표면에 가하는 힘  $nF_B \cos\theta$ 로 나눌 수 있다. 이를 식으로 나타내면 식 (14)와 같다.

$$F_{nm} = F_A + nF_B \cos\theta \quad (14)$$

$F_{nm}$  : Total attraction force of magnetic particles

$F_A$  : The force of magnetic particles on the surface

$F_B$  : The force of abrasive particles on the surface

$\theta$  : The limiting angle that abrasive particles affect the surface

자기입자 직경  $75\mu\text{m}$ , 연마입자의 직경  $1.5\mu\text{m}$ 를 기준으로 계산결과  $\theta$ 는  $15.94^\circ$ 이다. 한계 각도에 원주를 따라 뿔꼴하게 배열된 연마입자의 개수  $n$ 은 43개이고,  $\cos 15.94^\circ$ 는 0.96이므로  $F_B \cos\theta$ 를  $F_A$ 와 같다고 가정하고, 이를 식으로 나타내면 식 (15), (16)으로 나타낼 수 있다.

$$F_B \cos\theta \approx F_A \quad (15)$$

$$F_{nm} = (n + 1)F_B \quad (16)$$



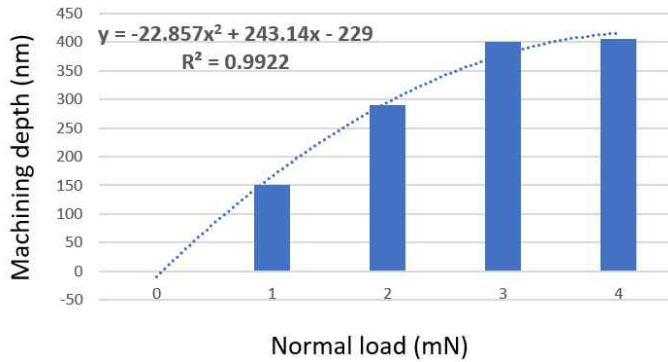


Fig. 3.9 Machining depth trend line according to normal force

시뮬레이션 결과 중 자석이 자기입자를 당기는 힘을  $F_{mm}$ 에 대입하고,  $n+1$ 로 나누면 연마입자가 표면에 가하는 힘  $F_B$ 는  $75.4nN$ 이다. 단일 연마입자의 표면 가공특성에 관한 이전 연구[39]에서 알루미늄재질에 다이아몬드 팁으로 직선방향으로 가공했을 때 수직력에 따른 가공 깊이를 기준으로 나온 계산된 추세선은  $y=-22.857x^2+243.14x-229$ 이다. 이 식에서 힘이 0이면 절입깊이는 0이기 때문에 절편을 제외한 식에  $75.4nN$ 을 대입하면  $0.003055nm$  절입깊이가 나오고, 정도가 6배 차이이기 때문에[10]  $0.0005nm$ 가 1회 가공 시 가공 깊이라고 볼 수 있다. 연마입자에서 수직으로 표면과 닿는 좌우 위치의 길이를  $w$ 로 가정하고 가공 폭을 Fig. 3.9의  $w$ 로 나타낼 수 있다.

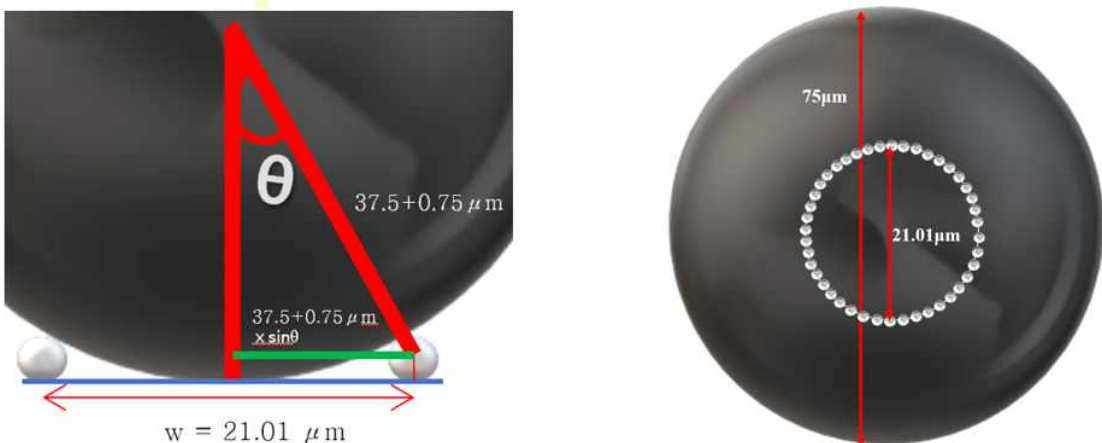


Fig. 3.10 Schematic diagram of machining width calculation

MAF를 30분 진행한 표면의 가공 깊이는 측정결과  $6\mu\text{m}$ 이고, 가공시간에 따른 가공 깊이를 나타낸 결과는 4장 Fig. 4.4에 나타내었다. 이 가공 폭과, 가공 깊이를 기준으로 MRR을 계산하고, 비에너지  $u(\text{W}\cdot\text{s}/\text{mm}^3)$ [10]는 2~5에서 2를 적용하고, Hz 20을 제1장 2절 2. 자기입자가공의 이론적 배경식 (11)에 대입하면  $F_c$ 는  $3.502\mu\text{N}$ 로 계산된다. 여기서 연삭이론의 실험적 결과에 따라  $F_n$ 은  $F_c$ 에 1.3배 이므로  $F_n$ 은  $4.553\mu\text{N}$ 이 나온다. 이  $F_n$ 은 자기입자와  $n$ 개의 연마입자로 구성된 자기입자군(Magnetic particle group)를 기준으로 계산한 MRR을 통해 역계산한 결과이고, 이  $F_n$ 과, 앞에서 시뮬레이션하여 계산된  $F_{nm}$ 은 모두 자기입자군이 표면에 가하는 힘이다. 시뮬레이션으로 계산된 값과, 연삭이론을 변형한 식(11)에 실험을 통해 얻은 MRR값을 통해 역계산 한 값 사이에  $1.32\mu\text{N}$  차이가 나는데, 이는 자유입자 가공에서 비에너지 값이 다를 수 있고, 가공이 진행됨에 따라 가공 폭이 점점 넓어지고, 연마에 사용되는 입자가 완전한 구형이 아니기 때문에 발생한 오차로 판단된다.

## 다. 진동Hz에 따른 MAF 가공특성

본 연구의 MAF에서 진동Hz는 기존 MAF에서 공작물의 회전수를 대체 했기 때문에 중요 변수이고, 이에 대한 설명은 제1장 2절 2에 나타내었다. 진동Hz에 따라 가공횟수가 달라지기 때문에 진동Hz에 따른 표면의 변화를 분석했다. 본 실험에서 진동Hz가 25Hz보다 높아지면 자석의 이동속도가 빨라 자기입자가 제대로 따라오지 못하고 표면이 가공되지 않는다. 따라서 Hz의 범위는 5~25Hz에서 실험했다. Table. 3.1은 MAF 실험조건을 나타낸 것이고, Fig. 3.6은 CCD카메라 관찰 위치 및 AFM 측정 위치를 나타냈다. Fig. 3.7은 진동Hz에 따른 표면의 CCD 카메라 화면, Fig. 3.7은 AFM 측정결과를 나타내었다. Fig. 3.8는 진동Hz에 따른 Ra, Rz값의 변화를 나타낸 그래프이다.

Table. 3.1 MAF experimental condition according to vibration frequency

Abrasive slurry mixing ratio (7:1)	
Magnetic particle	1.75g (Iron powder-75 $\mu$ m)
Abrasive particle	0.25g (WA/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 1.5 $\mu$ m/#10000)
Lubricant	2.5ml (Water soluble)
Vibration Hz	5, 15, 25 Hz
Finishing time	360s

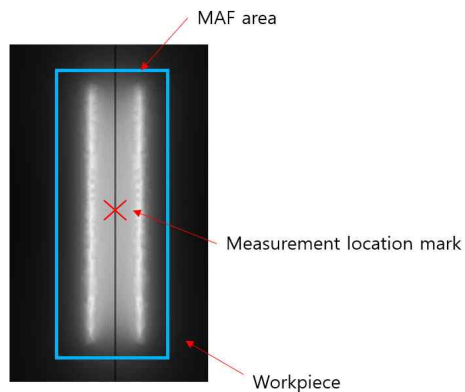
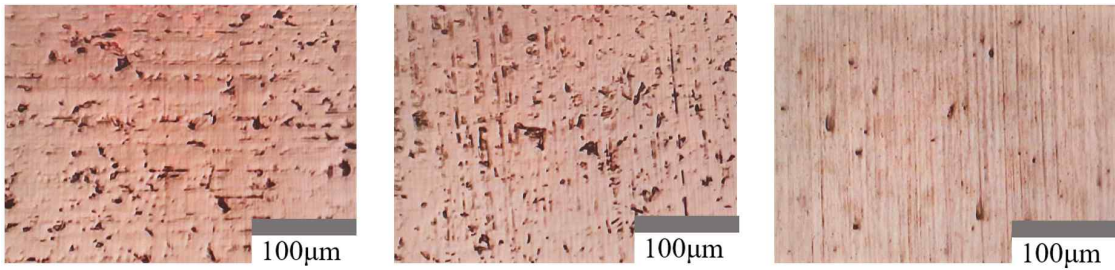


Fig. 3.11 Measurement location



A. 5Hz MAF surface

B. 15Hz MAF surface

C. 25Hz MAF surface

Fig. 3.12 MAF-processed surface CCD camera view according to vibration frequency

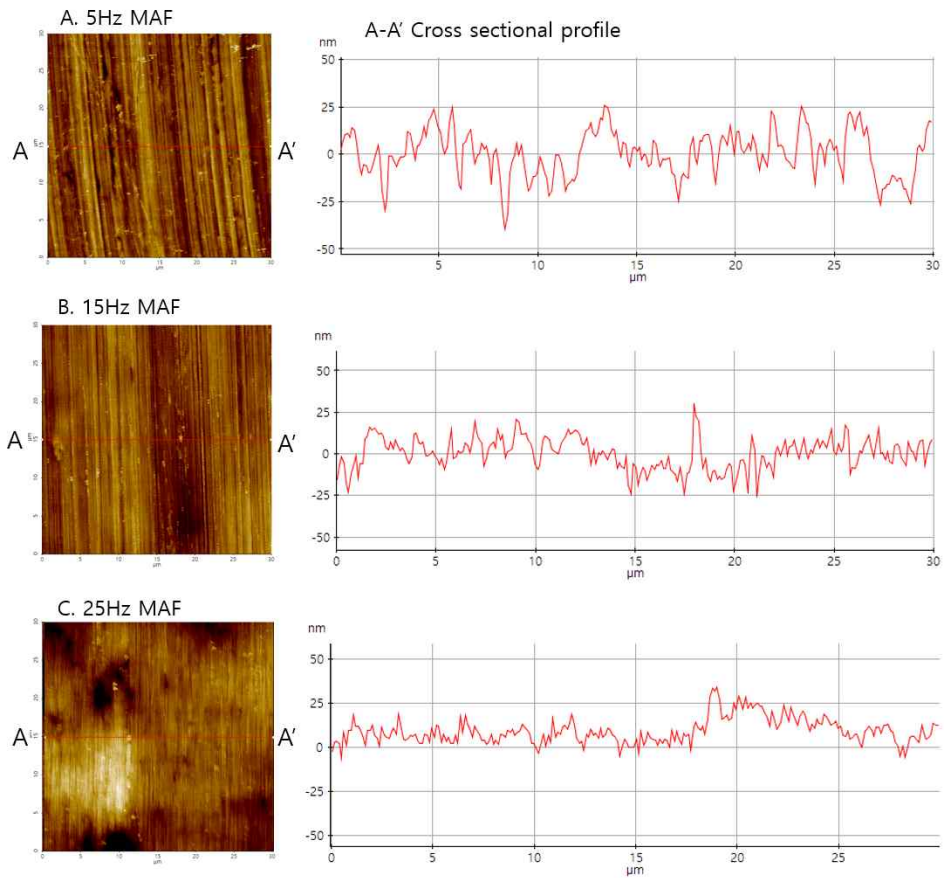


Fig. 3.13 AFM images according to vibration frequency

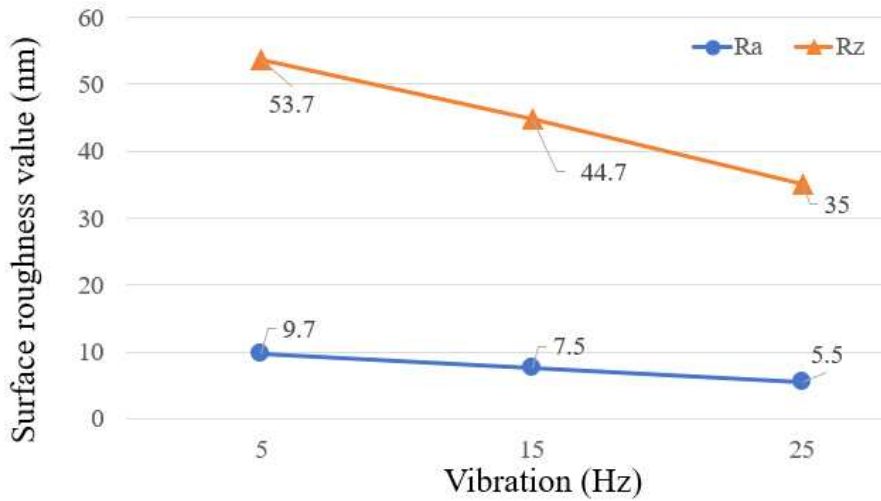


Fig. 3.14 Surface Ra, Rz value variation according to vibration frequency

Fig. 3.6을 보면 진동Hz가 올라갈수록 표면의 연마가 더 진행된 것을 볼 수 있고, 진동Hz가 높아질수록 표면 결점이 사라지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.7 단면선도를 보면 진동Hz가 높을수록 단면선도의 산과 골 높이가 균일해지고, 입자에 의한 가공횡수가 늘어남에 따라 요철(凹凸)사이 간격이 더 조밀해진다. Fig. 3.8을 보면 진동Hz가 올라갈수록 Ra값과 Rz값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 25Hz로 6분 가공한 표면도 큰 결점이 관찰되는데, 이유는 MAF 가공 시 표면에 큰 결점이 있는 경우 슬러리가 결점에 갇혀 제대로 가공되지 않기 때문이다. 이는 기존 연구[11]에서 연구된 내용으로, MAF는 큰 결점을 메우기 어렵고 가공시간이 많이 걸린다. Fig. 3.7은 CCD카메라 화면의 결점을 오픈소스인 ImageJ[49]를 사용하여 영상분석한 결과이다. 결과 히스토그램을 보면 5Hz로 MAF 진행한 표면은 5~10 $\mu$ m 직경의 Pit가 190개로 가장 많이 관찰되고, 10~15 $\mu$ m 크기의 Pit도 60개 이상 관찰된다. 하지만 25Hz로 MAF 진행한 표면은 직경 5~10 $\mu$ m크기의 결점이 가장 많이 관찰되고, 개수 또한 30개 이하로 큰 결점이 상당수 제거되었다고 판단된다.

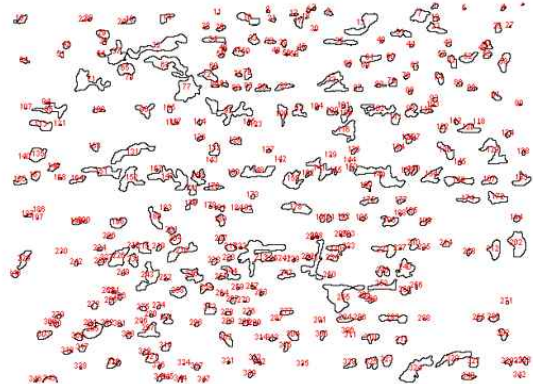
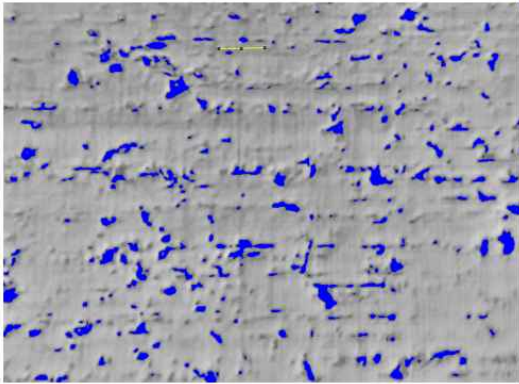
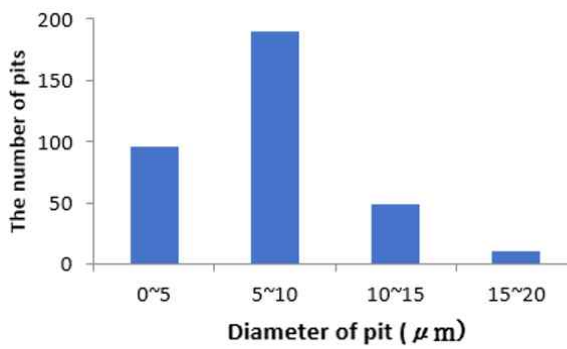
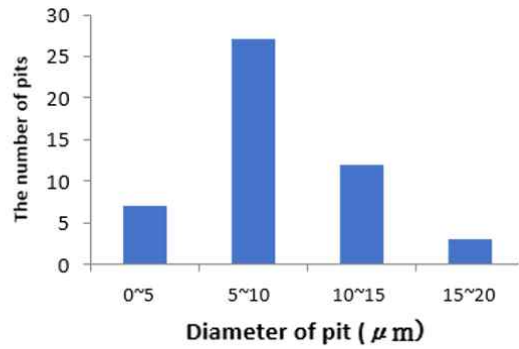


Fig. 3.15 Surface image analysis process



A. Diameter histogram of pits on 5Hz MAF processed



B. Diameter histogram of pits on 25Hz MAF processed

Fig. 3.16 Surface defects histogram according to Hz

## 라. 습식, 건식 MAF 가공특성

기존의 MAF가공에서 습식과 건식에 따라 결과표면 Ra값을 분석한 연구[25]를 참고하여, 본 연구의 MAF 방식에 적용하고, 가공 정도의 차이를 확인한다. Fig. 3.9는 건식과 습식가공방식으로 가공된 표면의 CCD카메라 화면이다. Fig. 3.9에서 같은 시간 동안 가공한 표면을 보면 A표면은 큰 결점이 보이는데 반해 B표면은 큰 결점이 거의 보이지 않는다. 이는 습식가공 시 표면의 마찰력을 줄여줌으로서 슬러리의 거동이 원활하게 도와주기 때문으로 보인다. 따라서 습식가공이 건식가공에 비해 가공이 더 잘된다고 판단된다. 따라서 본 연구의 하이브리드 가공에서 MAF방식은 습식가공으로 통일하여 진행했다.

Table. 3.2 MAF experimental condition according to processing method

Abrasive slurry mixing ratio (7:1)	
Magnetic particle	1.75g (Iron powder - 75 $\mu$ m)
Abrasive particle	0.25g (WA - 1.5 $\mu$ m)
Lubricant	2.5ml (Water soluble)
Vibration Hz	20 Hz
Finishing time	360s

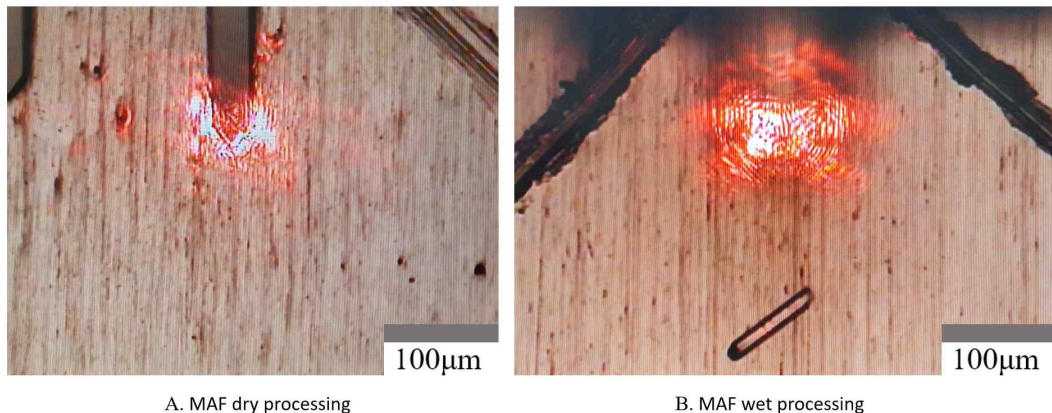


Fig. 3.17 CCD camera view by processing method

### 3. PECP 가공영향 인자에 따른 가공특성 확인

PECP에 영향을 주는 인자는 전해액의 종류, 전해액 온도, 전극과 공작물의 간격, 전류 전류, 전압, Duty factor, Hz이다. 하이브리드 가공은 두 공정이 융합되어 공정변수가 많으므로, 기존의 가공영향 인자에 따른 연구결과[44]을 참고하여 가공시간과 전류밀도를 제외한 나머지 변수는 최적가공 조건으로 진행하고, 교차가공, 하이브리드 가공 시 PECP시간에 따른 결과와 비교하기 위해 가공시간에 따른 표면을 CCD카메라로 확인하고 비교한다. Fig. 3.7은 공작물의 CCD카메라 관찰 위치 및 AFM 측정 위치를 나타내었다. 측정 위치는 버블(Bubble)에 의해 전기화학적 반응을 간섭받지 않고, 공작물이 침지된 위치부터 10mm깊이 공작물 중심에 마킹하고 측정한다.

Table 3.3 PECP experimental condition according to polishing time

Electrical condition	
Current density	0.6 A/cm <sup>2</sup>
Electrode gap	5 mm
Frequency	425 Hz
Duty factor	50%
Polishing time	20, 40, 60, 80, 100, 120s

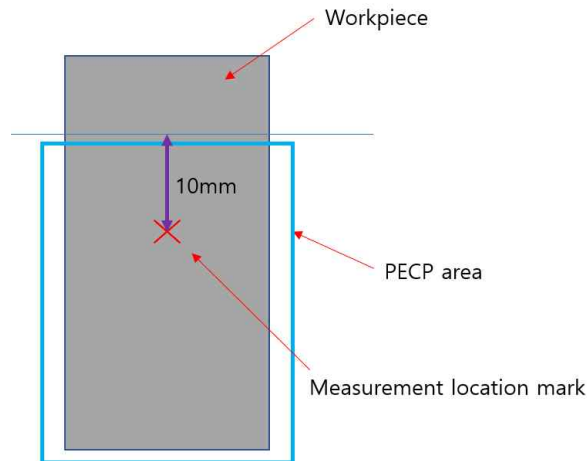


Fig. 3.18 Measurement location



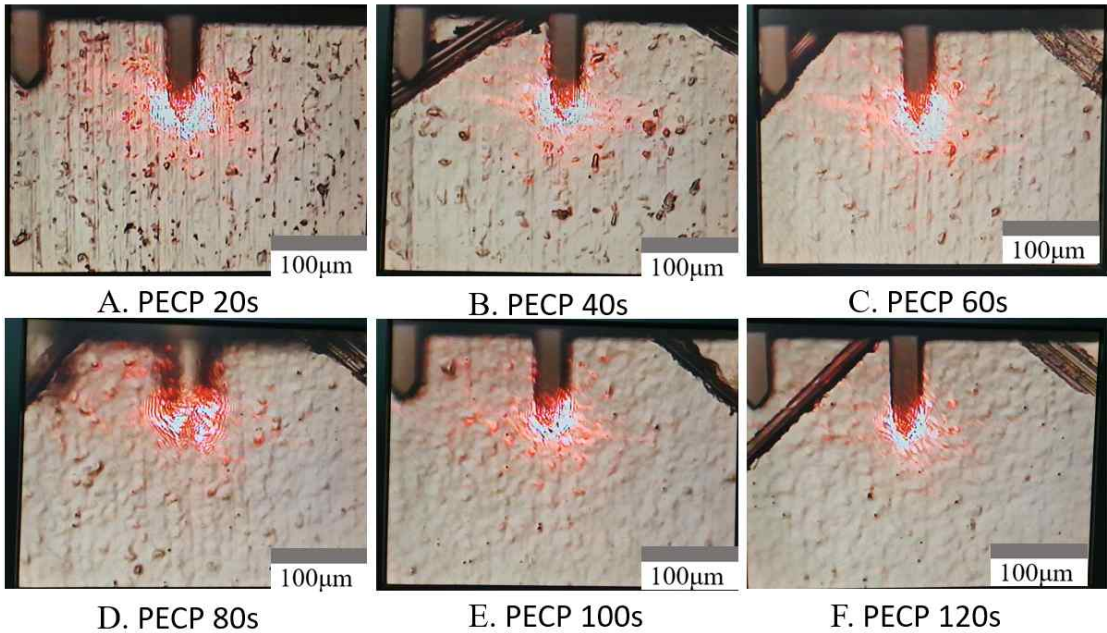


Fig. 3.19 CCD camera view according to polishing time

가공시간에 따른 표면의 변화를 확인하기 위해 0~120s 동안 20s 간격으로 진행한 표면을 CCD 카메라 화면을 통해 관찰하였다. Table. 3.2 는 PECP 가공조건을 나타낸 표이고, Fig. 3.10는 PECP시간별 표면의 CCD카메라 화면이다.

Fig. 3.10를 보면 PECP시간이 길어질수록 표면의 결점이 사라지는 것을 확인할 수 있다. C와 D를 보면 D가 C보다 울퉁불퉁한(Bumpy) 표면을 보이는데 이는 전기화학적 반응이 본격적으로 이루어지며 용해된 재료가 뭉치는 과정으로 보인다. C는 본격적인 전기화학적 반응이 일어나기 전 상태로 보이기 때문에 표면에 울퉁불퉁한 형태가 나타나지 않는다. 하지만 소재 가공 시 생긴 세로 선이 보이는 것으로 볼 때 원래 표면의 철(凸)부위가 완전히 용해되지 않은 상태로 볼 수 있다. 이후 E와 F에서 표면 용해가 활발해지며 결점이 채워지는 것이 보이고, E와 F에서 소재 가공 시 생긴 세로 선이 사라지는 것을 확인할 수 있다.

## 제2절 MAF 가공 후 PECP 가공 특성

본 실험은 MAF를 진행한 표면에 PECP를 진행하고, PECP의 시간별 표면을 관찰, 측정하고 MAF표면에 PECP가 미치는 영향을 확인하는 것이 목적이다. Table 3.4는 MAF →PECP 교차가공 실험조건을 나타내었다. Fig. 3.11은 MAF 가공한 표면에 PECP 진행한 시간에 따른 CCD카메라 화면이다.

Table 3.4 Experimental condition of MAF→PECP according to polishing time

<b>Electrical condition</b>	
Current density	0.6 A/cm <sup>2</sup>
Electrode gap	5 mm
Frequency	425 Hz
Duty factor	50%
Polishing time	20, 40, 60, 80, 100, 120s
<b>MAF - Wet processing</b>	
Abrasive slurry mixing ratio (7:1)	
Magnetic particle	1.75g (Iron powder)
WA	0.25g - #10000(1.74μm)
Lubricant	2.5ml
Vibration Hz	15Hz
Finishing time	360s

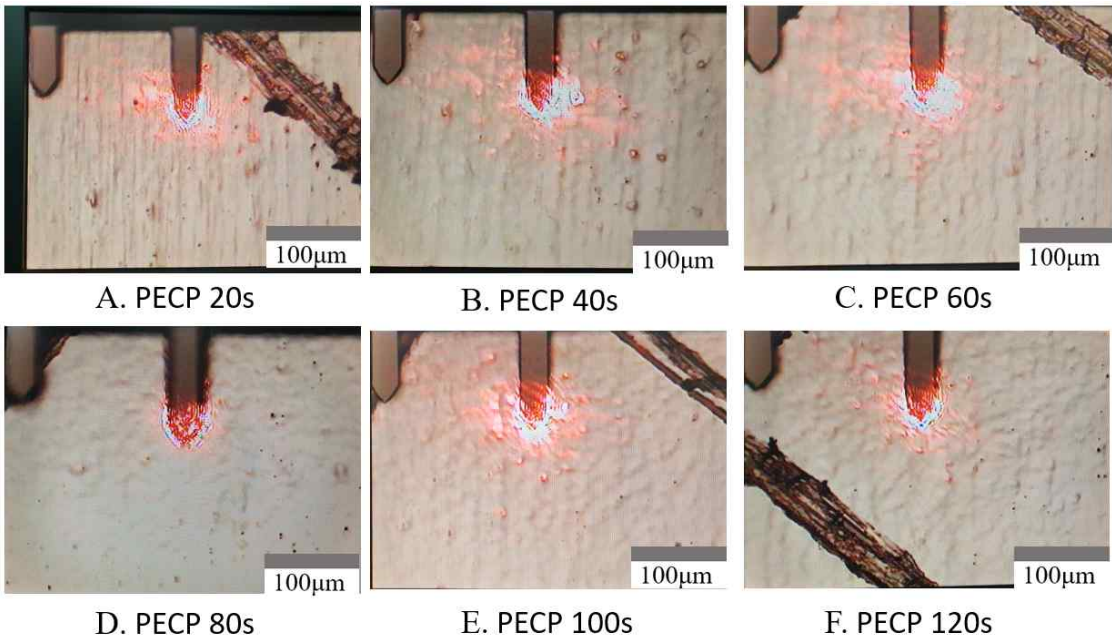


Fig. 3.20 CCD camera view according to PECP time on MAF surface

Fig. 3.11을 보면 D. PECP 80초부터 표면에 MAF의 연마입자에 의한 스크래치마크가 관찰되지 않는다. 이미 1차적으로 MAF가 진행되었기 때문에 C. PECP 60s부터 결점이 표면 용해에 의해 메워지는 것이 확인되고, 이는 단순 PECP만 진행한 이전 실험보다 빠르다. D를 보면 Micro-pit가 관찰되고, 이는 전기화학적 반응이 본격화 되어 생긴 것으로 보인다. MAF로 1차적 가공이 이루어졌기 때문에 PECP만 진행한 표면에 비해 전반적으로 표면품질이 높다. 이 결과를 통해 MAF표면에 PECP를 진행하는 것이 긍정적 효과를 준다고 판단된다.

### 제3절 PECP 진행 후 MAF 가공특성

본 실험은 PECP진행한 표면에 MAF를 진행하여, MAF가 PECP표면에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위한 목적이다. Table. 3.5의 조건으로 자기입자와 연마입자의 크기를 다르게 가공하고, 슬러리의 입자조성별 3분, 6분으로 나누어 가공시간에 따른 차이를 확인했다. Fig. 3.12는 각 가공조건에 따른 표면을 CCD 카메라로 확인한 결과이다. Fig. 3.13는 각 표면을 AFM으로 측정한 결과이다. Fig. 3.14는 가공조건별 Ra, Rz를 비교한 그래프이다.

Table 3.5 Experimental condition of PECP→MAF according to abrasive particles size

Electrical condition	
Current density	0.6 A/cm <sup>2</sup>
Electrode gap	5 mm
Frequency	425 Hz
Duty factor	50%
Polishing time	180s
MAF - Wet processing	
Abrasive slurry mixing ratio (7:1)	
Magnetic particle	1.75g (Iron powder)
Abrasive particle	0.25g (WA/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 1.5μm, 0.5μm)
Lubricant	2.5ml
Vibration Hz	15Hz
Finishing time	180s, 360s

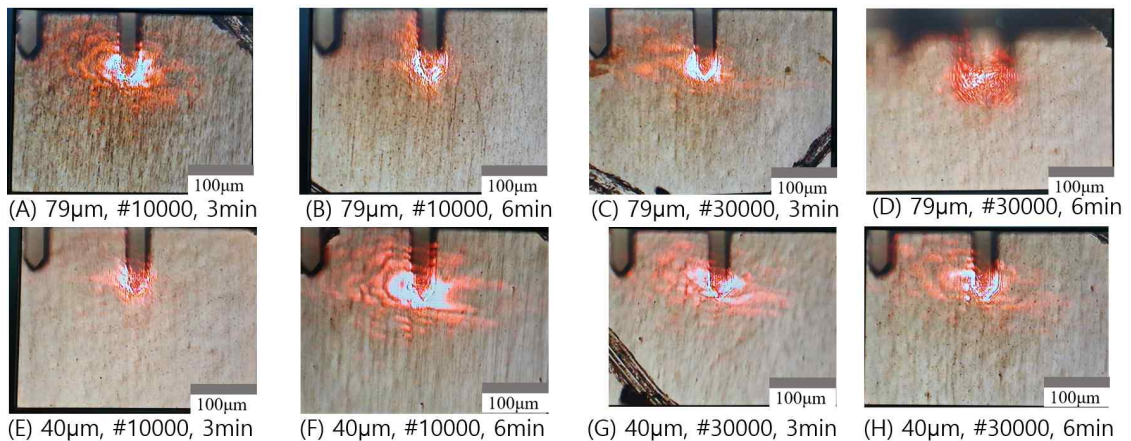


Fig. 3.21 CCD camera view according to particle size and MAF time

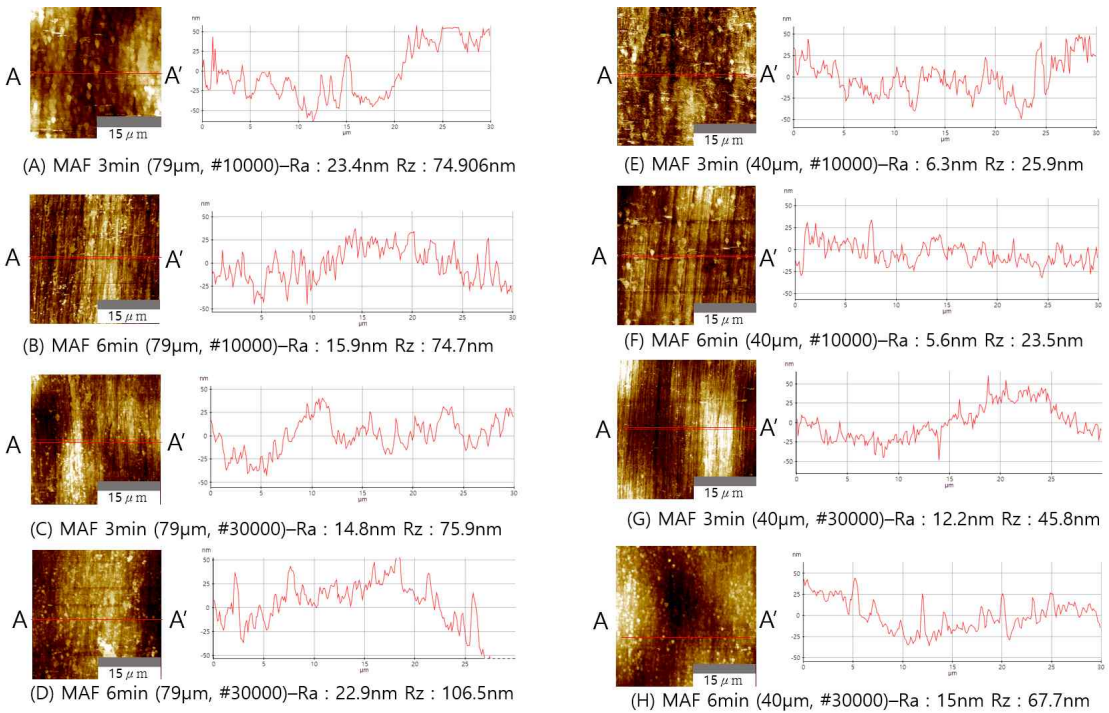


Fig. 3.22 AFM results according to particle size and MAF time

Fig. 3.14를 보면 75μm으로 진행한 표면은 가공시간이 길어질수록 표면거칠기값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 반면 45μm으로 진행한 표면은 가공시간이 길어질수록 표면에 입자에 의한 세로 스크래치마크가 선명해지는 것을 확인할 수 있다. 이런 결과는 이미 PECP가 진행되어 평활화된 표면에 입자가공했기 때문이다. 이미 표면이 평활화되었기 때문에 강한 자기력으로 가공을 진행하면 Fig. 3.12 A처럼 가공에 의한 스크래치마크가 진하게 관찰된다. 하지만 가공시간이 길어짐에 따라 스크래치마크가 겹치면서 가공 폭과 깊이가 일정해지며 요(凹)철(凸)이 조밀해지며 B와 같이 스크래치마크가 열어짐을 확인할 수 있다. C표면은 자기입자의 크기가 커서 자기력은 세지만 연마 입자가 작아 연마 입자에 의한 스크래치마크가 A에 비해 옅다. D표면의 경우 작은 연마입자에 의해 긴 시간동안 가공폭이 평균화되어 CCD카메라 화면으로 보이는 표면에 스크래치마크가 관찰되지 않는 표면이 관찰된다. 반면에 E의 경우 이미 평탄화된 표면에 작은 자기력으로 가공하기 때문에 표면에 육안으로 관찰되는 스크래치마크는 보이지 않지만 PECP표면에서 보이는 Micro-pit가 없는 좋은 품질의 표면이 관찰된다. 하지만 가공시간이 길어짐에 따라 연마입자에 의한 스크래치마크가 진해진다. G표면은 기

존 PECP표면과 비교했을 때 Micro-pit는 제거되었지만, PECP의 울퉁불퉁한 표면을 그대로 보여준다. 이는 자기력이 약하고, 연마입자도 작아 거의 가공되지 않아 PECP진행된 표면의 형태로 보인다. H표면은 가공시간이 길어짐에 따라 F표면과 유사하게 입자에 의한 스크래치마크가 잘 보이는 표면으로 관찰된다. Fig. 3.12 CCD카메라 화면을 보면 C와 F가 적절한 표면으로 보이고, Ra값과 Rz값이 낮은 두 결과를 동시에 만족하는 E가 최적의 조건으로 보인다. 이 결과를 바탕으로 보았을 때 이미 평탄화된 표면에 입자가공을 할 때는 기존의 MAF와 다른 가공인자 메커니즘이 발생한다. 높은 품질의 표면을 얻기 위해서는 작은 자기입자와 큰 연마입자로 짧은 시간 가공하는 것이 높은 품질의 표면을 얻을 수 있다고 생각된다. 하지만 MAF가 마지막으로 진행된 표면은 입자에 의한 스크래치 마크가 표면에 남을 수밖에 없으며, Fig. 3.12에서 육안으로 보이지 않았던 스크래치 마크가 AFM으로 측정한 Fig. 3.13의 C, F를 보면 nm단위로 가공 폭과 가공 깊이를 가지고 있는 작은 요철(凹凸) 있는 표면이 확인된다. 따라서 본 연구의 목적인 Ra, Rz값이 좋고, 표면에 결점이 없으며, PECP의 단점인 Micro-pit가 없는 표면의 조건은 만족하지만, 입자에 의한 스크래치마크를 피할 수 없어 MAF로 마무리하는 가공은 적절하지 않다.

## 제4절 MAF, PECP 교차가공 기초특성분석 고찰

MAF와 PECP 교차가공을 통해 MAF가 PECP표면에 미치는 영향과, PECP가 MAF에 미치는 영향을 확인하였다. 위의 실험결과로 MAF→PECP, PECP→MAF 모두 장점이 있고, MAF 표면에 PECP를 진행하는 경우 기존의 PECP 단독 가공에 비해 짧은 시간에 좋은 표면을 얻을 수 있었으며, PECP 진행된 표면에 MAF를 진행하는 경우 이미 평탄화된 표면에 가공하기 때문에 상대적으로 적은 자기력으로도 높은 품질의 표면을 보였고, PECP에서 보이는 Micro pit가 보이지 않았다. 이 결과로 보았을 때 MAF와 PECP가 상호 긍정적인 영향을 주는 것으로 생각된다. PECP진행한 표면에 MAF를 진행하는 경우 높은 품질의 표면 조건을 대부분 만족하지만 입자가공에 의한 스크래치마크를 피할 수 없는 것이 단점이다. 하지만 이 첫 번째 단점은 PECP가 큰 결점을 매우는데 도움을 줄 수 있고, 두 번째 단점역시 PECP가 전기화학 반응에서 표면의 철(凸)부분을 선택적으로 용해시키므로, 결과 표면의 스크래치 마크를 사라지게 만들 수 있다. 이 결론으로 볼 때 두 가공방법을 융합하면 두 가공방식이 상호 긍정적인 영향을 미치고, 각 가공방식의 단점을 보완할것으로 예상되어 MAF와 PECP 하이브리드 가공방식에 대한 연구, 하이브리드 가공특성 분석이 필요하다.

## 제4장 MAF, PECP 이중공정 동시 하이브리드 가공

### 제1절 실험장치 및 시스템

MAF와 PECP를 융합하는 첫 번째 방식은 이중공정 동시 하이브리드 가공(Combined hybrid machining)이다. 이중공정 동시 하이브리드 가공은 두 가지 이상의 공정이 동시에 재료 제거에 기여하고, 두 공정 모두 같은 가공구역에 영향을 미친다. 이중공정 동시 하이브리드 가공방식은 향상된 재료제거율과 표면 무결성을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 MAF와 PECP의 융합 목적에 부합하는 하이브리드 가공방식으로 판단된다. Fig. 4.1은 복합가공 실험장치 개략도와 실제 실험장치 사진이다.

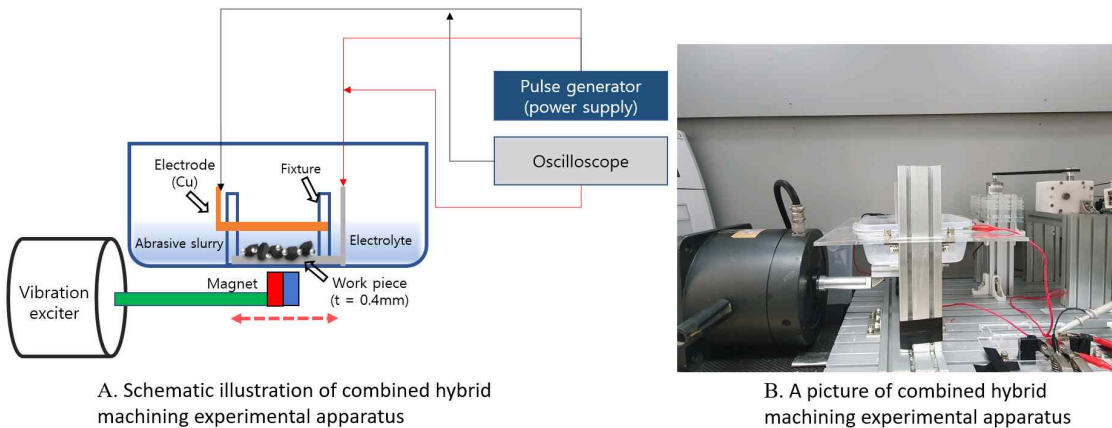


Fig. 4.1 Combined hybrid machining experimental apparatus

Fig. 4.1 A의 개략도처럼 공작물을 전해액조 바닥에 위치시키고 아래 자석이 좌우로 진동함에 따라 슬러리가 공작물을 기계적으로 가공한다. 가공진행중 공작물과 전극의 간격이 움직이지 않도록 Zig에 공작물과 전극을 고정시킨다. 그리고 전해액을 전극의 위치보다 높게 채우고, 공작물과 전극에 전원을 연결하고 전기화학적 가공한다. Magnetic brush 형태의 MAF방식에서는 틀이 강산 전해액에 닿고, 가공 시 전해액이 튀는 위험성이 있어 전기화학적 가공과 융합하기 어려우나, 본 실험의 MAF 형태는 자석이 전해액 외부에서 진동하기 때문에 위험성이 줄어든다. Fig. 4.2는 Combined hybrid



machining의 공정을 나타낸 개략도이다. Fig. 4.2의 공정의 순서를 보면 복합 하이브리드 가공 시 준비과정에서 공작물 고정과, 간격 조절 등 과정이 중복되어 공정의 순서가 줄어들면서 전체 공정시간을 줄일 수 있다. 이중공정 동시 하이브리드가공은 공작물의 세척 및 건조로 시작하고, 공작물 고정 및 자석과 전극, 공작물의 간격 조정된 뒤 슬러리를 준비하고, 전해액을 혼합하여 준비한다. 그리고 슬러리를 공작물 위에 위치시키고 진동장치 조건과 전기전원 조건을 설정한다. 이후 전해액조에 전해액을 넣고 공작물과 전극에 전기전원을 연결한다. 그리고 진동 전원과 전기전원을 동시에 인가하여 MAF와 PECP가 동시에 진행되도록 한다. 가공 진행 중 오실로스코프로 전압과 전류를 실시간 확인한다. 가공이 끝나고 공작물을 Acetone과 D.I Water에 순차 세척하고 건조 시킴으로서 전체 공정이 끝난다.

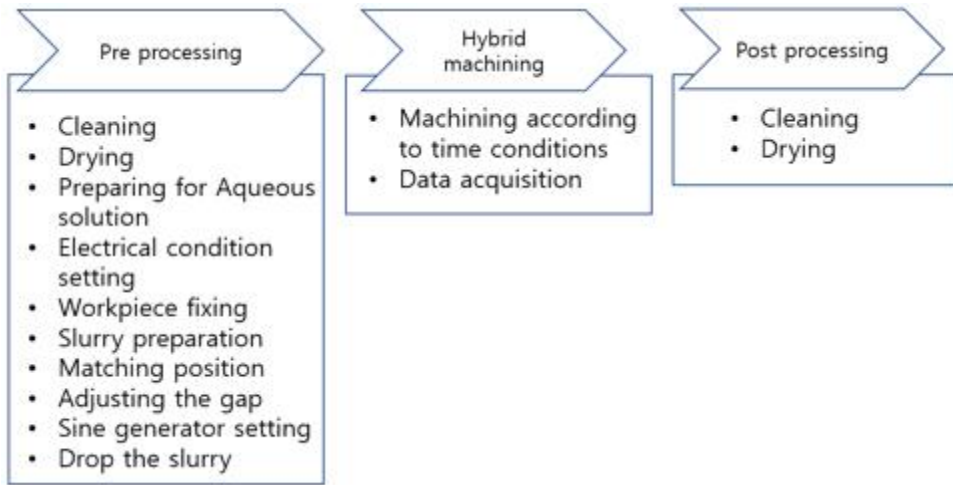


Fig. 4.2 Process schematic diagram of MAF PECP Combined hybrid machining

위의 실험장치에서 변수는 전류밀도, 가공시간으로 설정하였으며, 나머지 변수는 기존 연구를 참고하여 최적의 조건으로 진행했다. 이 하이브리드 가공방식에서 발생하는 문제는 전해액과 슬러리가 접촉하여 자기입자로 사용한 Iron powder가 강산과 반응하여 녹는 것이다. 따라서 자기입자를 STS304 Powder로 대체하여 진행했다. STS304 Powder는 내식성이 있어 강산과 반응성이 낮으며, Iron powder에 비해 자기력이 약하지만 본 실험에서 자석이 진동할 때 슬러리의 탈락이 일어나지 않고, 슬러리의 거동이 충분하다고 판단되어 STS304 Powder로 대체하였다. 자기입자는 MAF의 전반적인 가공 깊이와 가공 폭에 관여하는 중요 인자이기 때문에 바뀐 자기입자에 대해 MAF 사전실험을 진행했다. Table. 4.1은 Iron powder와 STS304 powder를 각각 자기입자로 사용해 차이를 확인하는 실험조건이다. Fig. 4.3은 자기입자 종류에 따른 AFM 측정결과이다.

Table. 4.1 MAF experimental condition according to magnetic particle type

Abrasive slurry mixing ratio (7:1)	
Magnetic particle	1.75g (Iron powder-75 $\mu$ m, STS304 powder-100 $\mu$ m)
Abrasive particle	0.25g (WA : 1.5 $\mu$ m)
Lubricant	2.5ml (Water soluble)
Vibration Hz	20 Hz
Finishing time	30 min

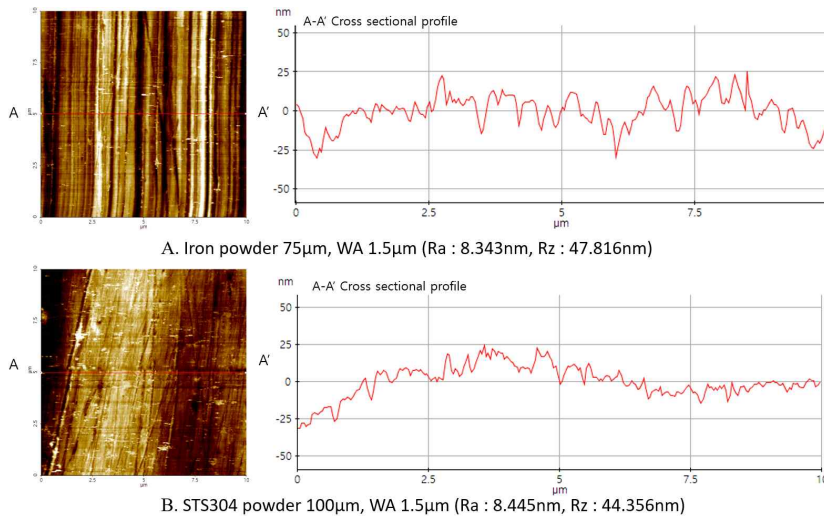


Fig. 4.3 AFM images according to type of magnetic particle

Fig. 4.3 A를 보면 표면에 입자에 의한 스크래치 마크가 B에 비해 두껍게 나타나고, 이는 A-A' 단면선도의 요철(凹凸)사이 간격으로 확인할 수 있다. A와 B는 같은 종류, 같은 크기의 연마입자를 사용했기 때문에 두 표면의 가공 폭, 가공 깊이에 영향을 미치는 요인이 자기입자임을 알 수 있다.

두 종류의 자기입자가 표면에 미치는 영향을 알아보기 위해 위 실험과 같은 조건으로 각 자기입자별로 30분, 60분 총 4번의 실험결과 표면의 가공 깊이는 Fig. 4.4와 같다. 스테인리스 스틸의 알려진 비에너지 값[10]과 자기입자 크기를 기준으로 식(11)에 대입하여 계산하면 Iron powder의  $F_c$ 는 식(14), STS304 powder는  $F_c$ 는 식(15)와 같이 계산된다. 두 계산 결과값이 약 2배 차이내고, 이전 자기입자 크기에 따른 자기력 측정결과[11]에서 50 $\mu$ m와 100 $\mu$ m사이  $F_n$  값이 2배 차이가 나기 때문에, STS304 Powder 100 $\mu$ m는 Iron powder 45 $\mu$ m와  $F_n$ ,  $F_c$ 값이 비슷하다고 볼 수 있다. 이 결과를 통해 이후 하이브리드 실험에서 Iron powder를 STS304 powder로 대체하여 사용했다.

$$F_{ci} = \frac{(2W \cdot s/mm^3) \times (21.01\mu m \cdot 12.02mm \cdot 6\mu m/30min)}{(12.02mm) \times (120 \cdot 20/min)} = 3.502\mu m \quad (14)$$

$F_{ci}$  : Cutting force of iron particle(75 $\mu$ m)

$$F_{cs} = \frac{(2W \cdot s/mm^3) \times (34.77\mu m \cdot 12.02mm \cdot 2\mu m/30min)}{(12.02mm) \times (120 \cdot 20/min)} = 1.93\mu m \quad (15)$$

$F_{cs}$  : Cutting force of STS304 powder

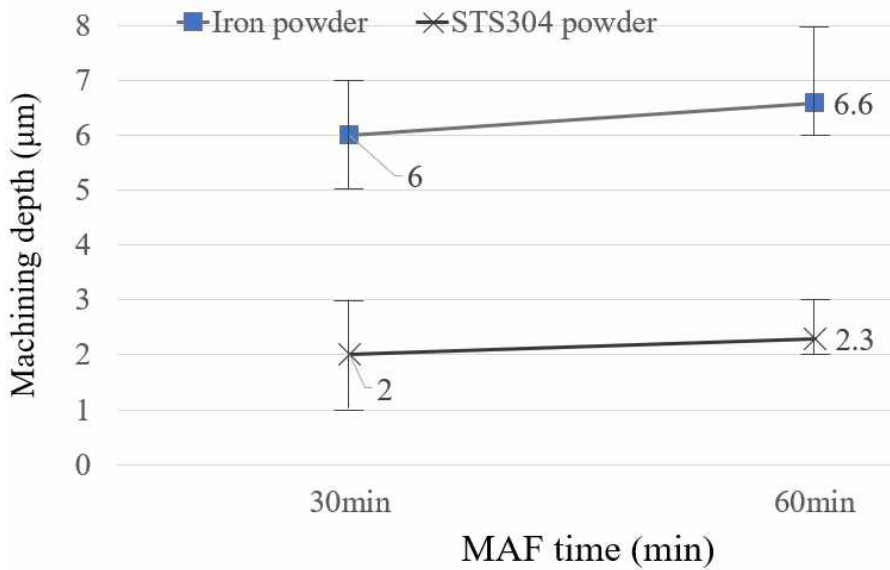


Fig. 4.4 Machining depth according to machining time

Fig. 4.4을 보면 MAF에서 가공시간이 길어짐에 따라 재료제거속도가 떨어지고, 이는 가공시간이 길어지면 연마입자가 마모되면서 연마력이 떨어지는 것으로 보인다. 이전 연구에서 MAF에 사용된 슬러리를 관찰한 결과 30분 이후 슬러리에 연마입자가 마모된 것을 확인할 수 있었다.[43] STS304 powder는 Iron powder에 비해 자기력이 약하지만 3장의 교차가공을 통해 PECP표면에 MAF를 진행하는 경우 작은 자기력으로도 높은 품질의 표면을 얻을 수 있음을 확인하였고, 기존의 전기화학적 반응이 기계적 가공에 도움을 주는 사실을 고려했을 때 STS304 powder가 하이브리드 가공에서 충분히 자기입자로 사용가능하다고 판단된다.

## 제2절 전류밀도에 따른 하이브리드 가공특성

본 실험은 전류밀도에 따른 이중공정 동시 하이브리드 가공특성을 확인하기 위한 실험이다. 기존 가공 인자별 PECP 연구를 참고하였을 때  $0.5A/cm^2$ 보다 높을 때 표면의 Ra값이 낮고, 더 높은 전류밀도에서는 표면의 Ra값이 크게 차이가 없다. 따라서 본 실험은  $0.4A/cm^2$ ,  $0.6A/cm^2$ ,  $0.8A/cm^2$ 의 전류밀도에서 이중공정 동시 하이브리드 가공을 진행하고 표면을 관찰 및 측정하여 하이브리드 가공특성을 확인한다. 실험조건은 Table 4.2 과 같다. Fig. 4.5는 공작물의 CCD카메라 관찰 위치 및 AFM 측정 위치를 나타내었다. 측정 위치는 두 가공의 영역이 겹치는 위치의 한 가운데에 마커로 표시하고 마커 근처  $300\mu m$ 이내의 영역에서 12시, 3시, 6시, 9시 방향 표면을 관찰하고 대표적인 경향을 나타내는 표면을 관찰하고, 측정하였다. Fig. 4.5는 이중공정 동시 하이브리드 가공을 진행한 표면의 CCD카메라 화면이다.

Table 4.2 Experimental Condition of combine hybrid machining according to current density

Electrical condition	
Current density	0.4, 0.6, 0.8 A/cm <sup>2</sup>
Electrode gap	5 mm
Frequency	425 Hz
Duty factor	50%
Polishing time	180s
MAF - Wet processing	
Abrasive slurry mixing ratio (7:1)	
Magnetic particle	1.75g (STS304 powder)
Abrasive particle	0.25g (WA/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 1.5 $\mu$ m)
Lubricant	2.5ml
Vibration Hz	15Hz
Finishing time	180s

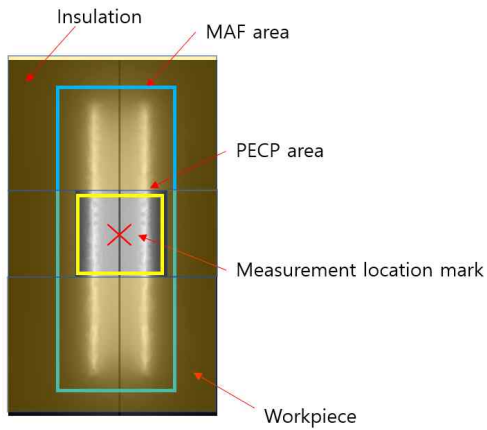


Fig. 4.5 AFM measurement area

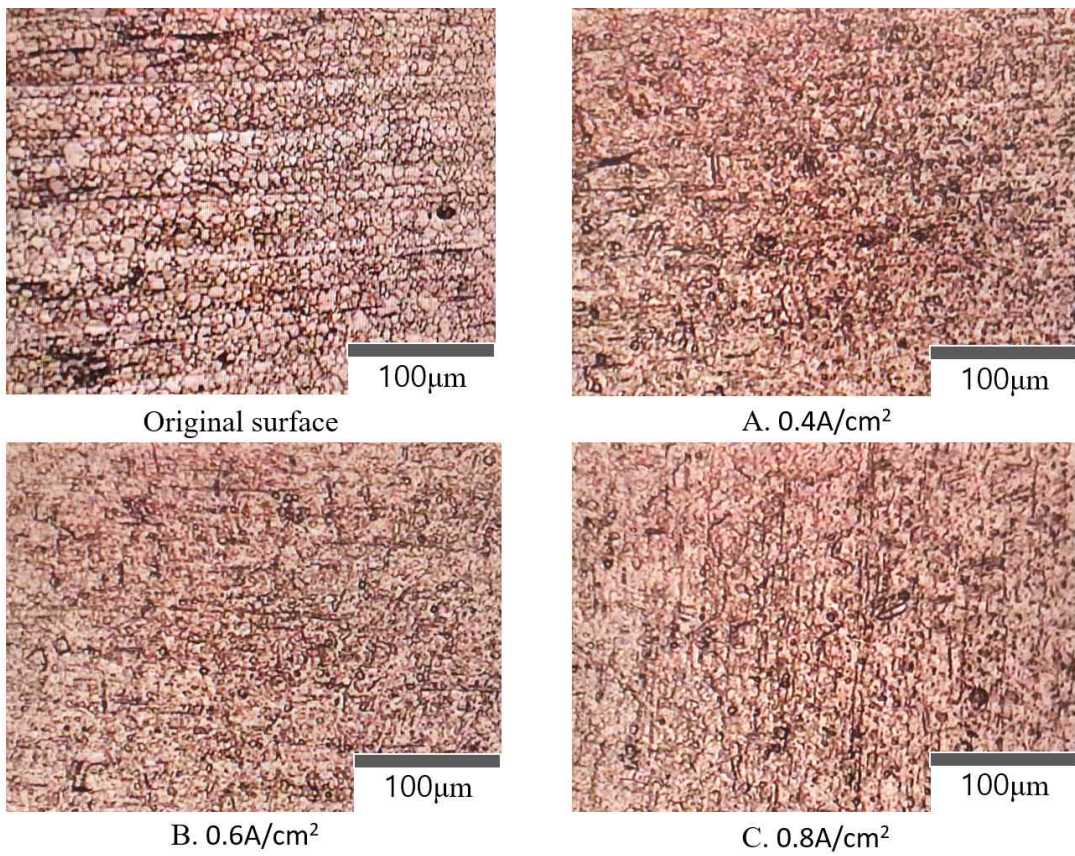


Fig. 4.6 CCD camera view according to current density

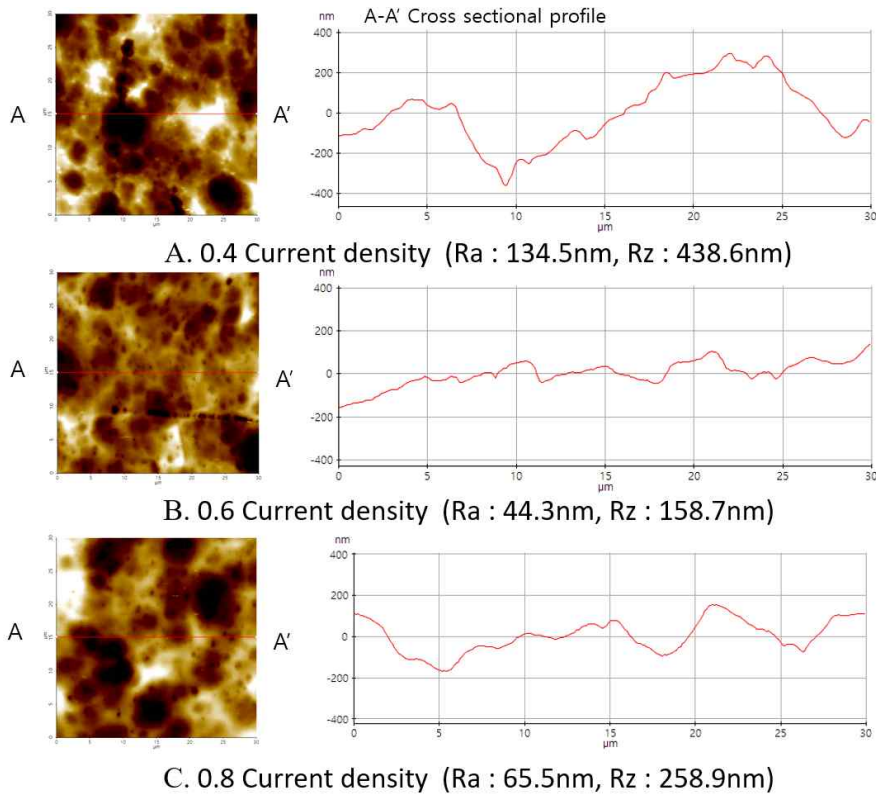


Fig. 4.7 AFM results according to current density

Fig. 4.5의 CCD 카메라 화면을 보면 전류밀도와 관계없이 표면에 요(凹)철(凸)과 큰 Pit가 많이 보인다. 또 Fig. 4.6 AFM 측정결과를 보았을 때 기존 표면의 Ra가 40~60nm 임을 고려했을 때 오히려 Ra값이 올라간 것을 확인할 수 있다. 표면에 작은 Micro-pit가 확인되는 것으로 보았을 때 전기화학적 반응은 일어난 것으로 보이지만, 이전 가공 조건에 따른 PECP 가공특성 분석논문[44]을 보았을 때 낮은 전류밀도에서 PECP를 진행한 표면과 같은 형태를 보인다.

이전 실험결과와 다르게 본 실험의 결과 표면에서 가공영역과 미가공영역의 가공깊이 차이는 육안으로 확인될 정도로 크다. 가공 전 표면의 두께는 0.4mm이고 전류밀도에 따른 가공 깊이를 확인하기 위해 1 $\mu$ m 해상도의 전자 Micrometer로 두께를 측정하고, 이종공정 동시 하이브리드 가공한 표면과 같은 전류밀도로 PECP가공한 표면을 비교했다. Fig. 4.7은 각 조건에 따라 다른 장소를 3번 측정하여 평균값을 나타낸 그래프이다. 먼저 PECP에 의한 가공 깊이는 전류밀도에 따라 깊어지는 것을 확인할 수 있다. 이종공정 동시 하이브리드 가공된 깊이는 PECP만 진행된 표면에 비해 같은 시간 동안 재료제거율이 1.43~1.83배 높다. 또 이전 STS304 powder를 이용한 가공시간에 따른 가공 깊이를 나타낸 Fig. 4.4를 보면 30분 가공했을 때 가공 깊이가 2 $\mu$ m이므로, 3분 가공한 이종공정 동시 하이브리드 가공에서 MAF는 무시가능한 가공 깊이로 생각된다. 이 결과로 보았을 때 이종공정 동시 하이브리드 가공에서 전기화학적 반응이 기계적 가공의 재료제거에 도움을 주는 것을 확인했다. 하지만 본 실험의 CCD카메라 화면과 AFM 측정결과로 보았을 때 표면의 무결성은 해당하지 않는 것을 확인했다.

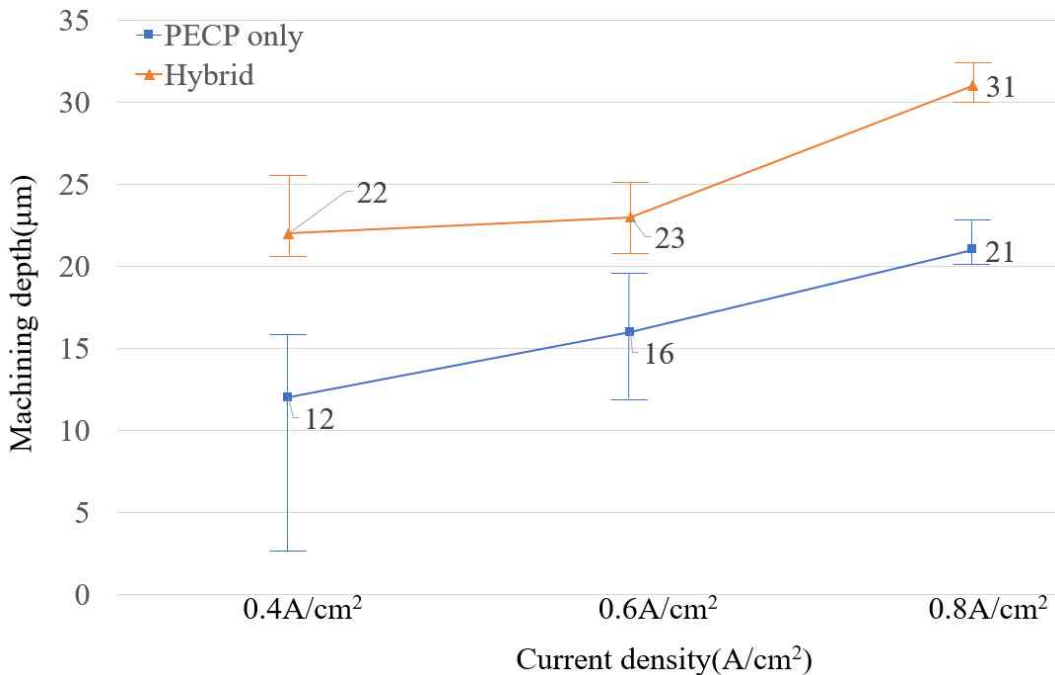


Fig. 4.8 machining depth according to current density



### 제3절 하이브리드 가공 후 PECP 시간에 따른 특성

본 실험은 이중공정 동시 하이브리드 가공한 표면에 PECP를 진행하여 표면의 변화를 확인하는 실험이다. 3장의 교차가공 실험에서 MAF표면에 PECP로 마무리하면 높은 품질의 표면이 나오는 것을 확인하였고, 이중공정 동시 하이브리드 가공한 표면에 PECP를 진행했을 때 같은 가공특성이 나타나는지 확인하고자 한다. 3장의 교차가공과의 차별점은 동시 하이브리드 가공된 표면이 MAF만 진행된 표면보다 재료제거량이 많은 표면에서 PECP가 진행되는 점, 교차가공에서는 MAF 공정이 끝나고 PECP가 진행되는 형태지만, 본 실험은 동시 하이브리드 가공이 진행되는 도중에 MAF만 시스템에서 빠지면서 PECP가 연속적으로 진행되는 점이 다르다. Table 4.3은 동시 하이브리드 가공 후 PECP를 진행한 실험조건이다. 이전 교차가공에서 MAF 가공된 표면에 PECP 진행했을 때 높은 품질의 표면이 나오는 적절한 PECP시간이 60초에서 90초였으므로 실험은 같은 시간 동시 하이브리드 가공한 표면에 PECP 시간을 45초, 90초 진행하여 비교하고, 같은 전체 공정시간 동안 동시 가공시간을 다르게 하고 PECP를 진행하여 전체 가공시간 동안 동시 하이브리드 가공과 PECP의 비율이 표면에 미치는 영향을 알아보기 위해 동시 하이브리드 가공 135초 진행하고 PECP 45초 진행, 동시 하이브리드 가공 90초 진행하고 PECP 90초 진행하여 비교하였다.

Table 4.3 Experimental condition of combine hybrid machining according to PECP time after combine hybrid processing

<b>Electrical condition</b>	
Current density	0.6 A/cm <sup>2</sup>
Electrode gap	5 mm
Frequency	425 Hz
Duty factor	50%
Polishing time	180, 225, 270s
<b>MAF condition</b>	
Abrasive slurry mixing ratio (7:1)	
Magnetic particle	1.75g (STS304 powder)
WA	0.25g - #10000(1.74μm)
Lubricant	2.5ml
Vibration Hz	15Hz

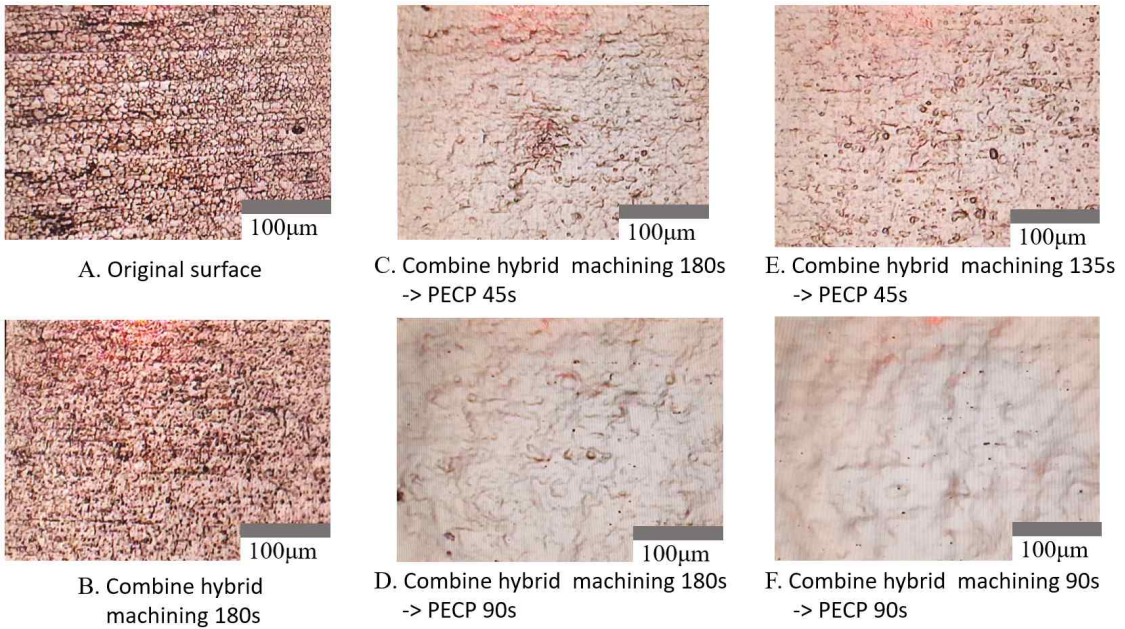
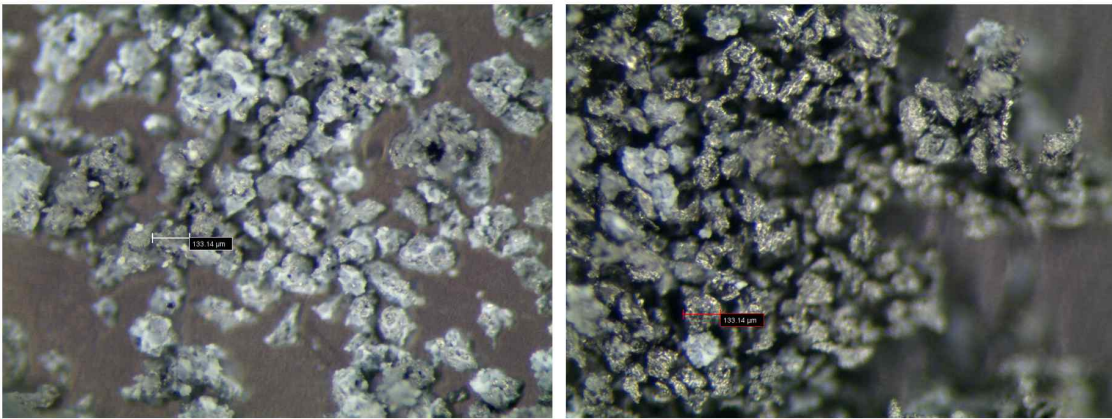


Fig. 4.9 CCD camera view of surface according to processing time

Fig. 4.8은 가공조건에 따른 표면의 CCD 카메라 화면이다. A는 가공 전 STS304평판의 표면이다. B는 동시 하이브리드 가공한 표면이고 A와 비교했을 때 A는 입자 사이 경계에서 골이 생기는데, B는 입자 사이의 경계가 사라지고 대신 표면 전체에 큰 Pit가 다발적으로 생기고, 낮은 품질의 표면이 확인된다. C는 동시 하이브리드 가공을 180초 진행하고 PECP 45초 진행한 표면이고, D는 동시 하이브리드 가공을 180초 진행하고 PECP 90초 진행한 표면이다. 이 CCD 카메라 화면으로 보았을 때 C와 D는 3장 2절의 MAF 표면에 PECP 진행한 결과화면보다 3장 1절 3의 STS304표면에 PECP만 진행한 표면에 가깝다고 생각된다. 또 E표면은 C표면과 같은 상태로 볼 수 있고, F는 다른 표면에 비해 표면에서 전기화학적 반응이 잘 일어났다고 볼 수 있다. 위의 CCD 카메라 결과로 보았을 때 교차가공에서 MAF 가공된 표면에 PECP를 진행한 경우 보다 동시 하이브리드 가공된 표면에 PECP를 진행한 결과 표면이 전기화학적 반응이 잘 일어나지 않았다. 같은 시간 동시 하이브리드 가공한 D와 F를 보면 동시 하이브리드 가공시간이 길어질수록 전기화학적 반응에 오히려 악영향을 미친다고 볼 수 있다.

## 제4절 이중공정 동시 하이브리드 가공특성 고찰

각 실험조건에 따른 이중공정 동시 하이브리드 가공결과로 보았을 때, 이중공정 동시 하이브리드 가공방식은 재료제거율은 향상시키지만 표면의 품질은 오히려 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 PECP의 전기화학적 반응이 MAF의 입자가공에 도움을 주어 재료제거율을 높이는 것으로 보인다. 하지만 MAF는 PECP의 전기화학적 반응을 간섭하여 표면의 용해가 잘 이루어지지 않고, 산화층이 생성되는 것을 기계적가공이 제거하기 때문에 안정적 산화층이 생기지 못한 것으로 보인다. Fig. 4.9는 이중공정 하이브리드 가공에 사용된 슬러리와 사용전 슬러리를 현미경으로 관찰한 사진이다. 먼저 Fig. 4.9 A 가공 전 자기입자를 보면 회백색을 띄고 B 동시 하이브리드 가공에 사용된 입자를 보면 입자의 색은 어두워지지만 입자 표면에 광택이 관찰된다. 이 현상은 PECP 가공에서 STS304 표면에 크롬과 니켈이 산화되며 광택이 생긴 것으로 보인다.[44] 이 결과로 보았을 때 자기입자가 전기화학적 반응을 일으키며 공작물의 전기화학 반응을 방해한 것으로 보인다.



A. Magnetic particles before machining

B. Magnetic particles after machining

Fig. 4.10 Microscopic image of magnetic particles (x90)

위의 결과로 볼 때 이중공정 동시 하이브리드 가공의 메커니즘은 Fig. 4.10의 개략도로 표현할 수 있다. 오른쪽 표면은 전기화학적 반응에 의해 용해가 진행되고, 산화막이 생성되기 시작한다. 동시에 왼쪽 슬러리가 진동에 의해 오른쪽으로 이동하며 표면을 가공하고 전기화학적 반응으로 용해된 표면과 생성되는 산화막을 가공한다. 슬러리가 오른쪽으로 이동하면 왼쪽에 전기화학적 반응이 일어나며 표면이 용해되고, 산화막이 생성되며, 진동에 의해 슬러리가 다시 왼쪽으로 이동하면서 용해가 시작되는 표면과, 생성되기 시작하는 산화막을 가공한다. 이 과정이 진동 Hz에 따라 반복적으로 진행되고, Hz가 높을수록 전기화학적 반응을 간섭한다고 볼 수 있다.

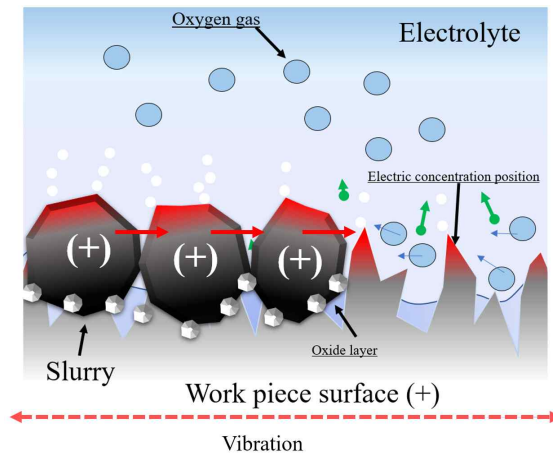


Fig. 4.11 Schematic diagram of MAF, PECP combine hybrid machining mechanism

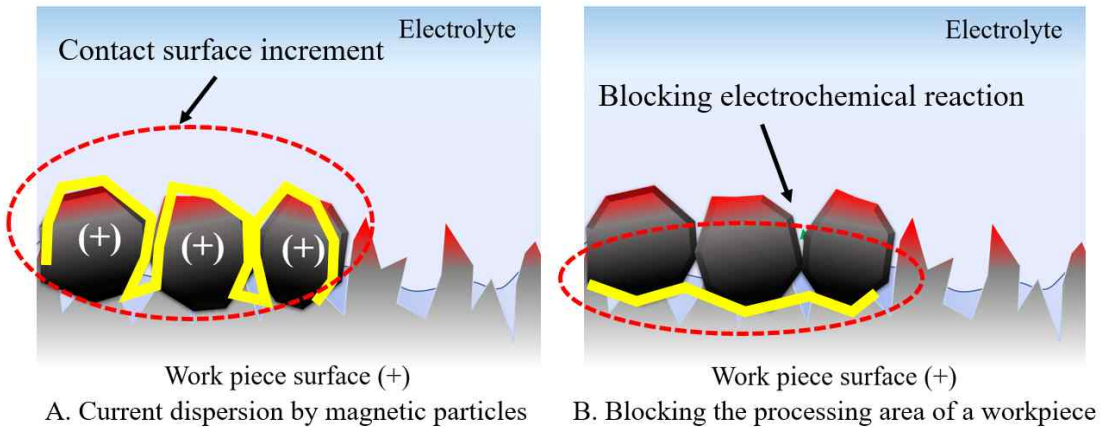


Fig. 4.12 Two cases in which magnetic particles interfere with electrochemical reactions

Fig. 4.11은 MAF, PECP 동시 하이브리드 가공에서 자기입자가 전기화학적 반응을 방해하는 두 가지 경우를 나타낸 개략도이다. 먼저 A의 경우 자기입자는 전기가 통하기 때문에 전원이 연결된 공작물에 자기입자가 접촉하면서 통전되어 전기화학적 반응이 입자에서도 일어난다. 따라서 입자에 의해 전류가 분산되고, 입자는 접촉면이 평면에 비해 넓기 때문에 전류 분산효과가 극대화된다. 따라서 공작물 표면에 전기화학적 반응이 잘 일어나지 않는다. Fig. 4.6을 보면 표면에 PECP의 초기반응인 기포 자국이 관찰되는것도 같은 이유이다. 두 번째 이유인 B는 자기입자가 공작물 표면에 위치하면서 공작물의 전기화학적 반응을 물리적으로 막는다. 첫 번째 문제는 자기입자에 전기가 통하지 않도록 코팅을 하면 문제가 해결되지만, 두 번째 문제의 경우 슬러리가 공작물과 전극사이에 위치하는 이중공정 동시 하이브리드 가공의 형태에서는 해결되지 않는다. 또 진동에 의해 슬러리가 전기화학적 반응을 주기적으로 방해하는데, 진동 Hz가 높아질수록 PECP에 악영향을 미친다. 진동 Hz를 낮추는 방안이 PECP에 도움을 줄 수 있으나, 본 연구의 MAF는 진동Hz가 가공의 핵심요소이기 때문에 Hz를 낮추는 방안은 MAF의 가공성을 극단적으로 낮추기 때문에 본질적인 해결책이 될 수 없다. 또 본 논문에서 제시된 실험 외 이중공정 동시 하이브리드 가공 후 추가적으로 MAF를 진행한 표면의 경우 교차가공(PECP->MAF) 표면과 다르게 입자에 의한 표면가공성이 매우 낮고, MAF의 영향이 거의 없음을 확인했다. 이는 동시 하이브리드 가공시 생기는 큰 Pit로 인해 연마재가 Pit에 갇히면서 제 역할을 하지 못하는 것으로 보인다. 따라서 이중공정 동시 하이브리드 가공의 경우 가공영역을 일치시키는 것이 표면품질에 악영향을 미치기 때문에 MAF와 PECP가 서로 간섭하지 않으면서 2장의 교차가공 기초특성처럼 상호 긍정적인 영향을 줄 수 있는 융합방식이 필요하다.

## 제5장 MAF, PECP 이종공정 순차 하이브리드 가공

### 제1절 실험장치 및 시스템

4장의 이종공정 동시 하이브리드 가공의 형태는 PECP가 MAF의 기계적가공에 도움을 주지만, MAF의 슬러리가 전기화학적 반응을 간섭하여, 재료제거율은 높지만 표면 품질이 떨어지는 것을 확인하였다. 하지만 3장 교차가공 특성분석에서 두 가공방식이 상호 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인했기 때문에, 본 실험에서는 슬러리가 PECP에 간섭하지 않으면서 두 가공방식의 장점을 얻기 위해 이종공정 순차 하이브리드 가공방식으로 실험장치를 구성하여 가공특성을 분석했다.

본 실험장치는 3장 MAF, PECP 교차가공에서 PECP 진행된 표면에 MAF를 진행하는 경우, MAF 진행된 표면에 PECP 진행하는 경우 높은 품질의 표면을 얻은 결과에 착안하여 전체 가공이 진행되는 동안 MAF와 PECP가 반복하여 진행되도록 설계하였다. Fig. 5.1은 이종공정 순차 하이브리드 가공 실험장치를 나타낸 개략도이다. A는 MAF와 PECP가 각각 진행되는 영역을 나타내었다. 전해액에 침지된 넓이만큼 PECP가 진행되고, MAF는 PECP 영역 밖에서 동시에 진행된다. 원판 형태의 공작물이 회전하며 PECP와 MAF공정이 전체 가공시간 동안 순차적으로 반복된다. B는 전체 실험 개략도를 나타낸 것이다. Fig. 5.2는 실제 실험장치 사진이다.

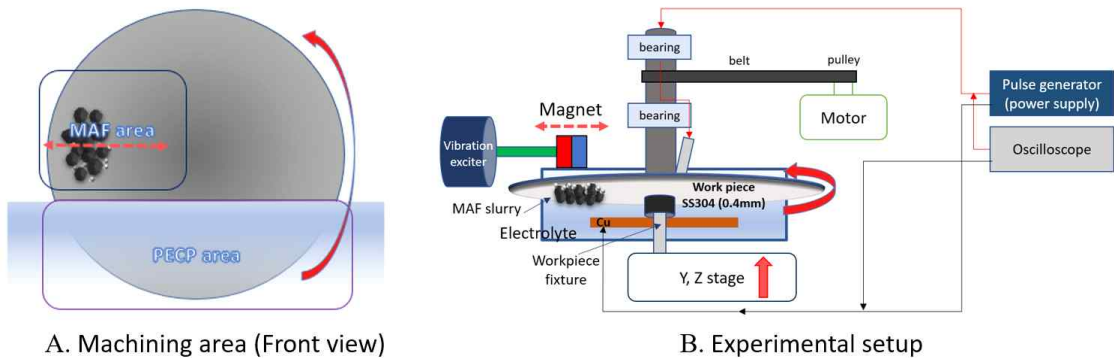


Fig. 5.1 Schematic illustration of experimental apparatus

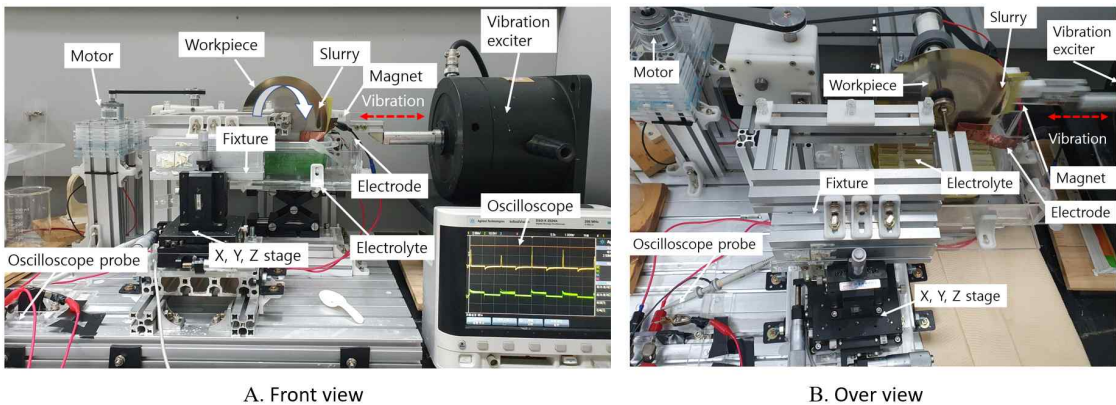


Fig. 5.2 Picture of experimental apparatus

본 실험의 공작물은 STS304 재질에 0.4mm 두께의 직경 15Φ 원판을 사용하였다. 공정순서는 먼저 전해액조에 전극을 포함한 지그를 놓고, 모터에 연결된 축에 공작물을 끼우고 앞쪽의 스테이지를 조절하여 공작물을 고정시킨다. 가진기에 연결된 자석을 공작물의 3시 방향에 위치시키고 그 위로 슬러리를 놓는다. 혼합한 전해액을 전해액조에 넣고, 공작물과 전극에 전원을 연결한다. 준비가 끝나면 가진기와 펄스전원을 동시에 인가하고, 오실로스코프로 전기적 Condition을 모니터링한다. 가공이 끝나면 아세톤과 D.I. Water로 순차 세척한다.

## 제2절 이중공정 순차 하이브리드 가공특성

### 1. 공작물 회전에 따른 MAF, PECP 가공특성

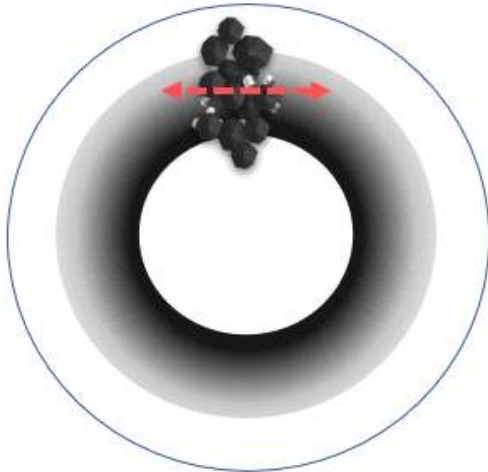
#### 가. 공작물 회전에 따른 MAF 가공특성

이전의 실험들과 다르게 본 실험은 공작물이 회전하기 때문에 MAF와 PECP 두 가공 방식 모두 추가 고려해야하는 요소가 생긴다. 먼저 MAF에서 고려할 첫 번째 요소는 공작물이 회전함에 따라 슬러리가 회전방향으로 밀려 탈락하는 현상이 생긴다. 해결방안으로는 공작물의 회전속도를 늦추는 방안과 공작물과 슬러리 사이의 마찰력을 줄여 주는 방안이 있다. 본 실험 전 슬러리가 탈락되는 공작물의 한계 RPM을 실험을 통해 찾았다. 건식으로 MAF를 진행하는 경우 공작물의 RPM이 0.5를 넘어가는 경우 슬러리의 탈락이 시작되는 것을 육안으로 확인하였고, 습식으로 가공하는 경우 1RPM까지 슬러리가 탈락되지 않았다. 두 번째 고려할 요소는 공작물이 세로 방향으로 세워져있기 때문에 중력에 의해 슬러리가 아래로 처지는 현상이 발생한다. 때문에 아래쪽은 연마가 잘되고, 위쪽은 거의 연마가 되지 않는다. 이 현상으로 인해 MAF가공위치에 따라 결과표면의 가공형태가 달라지는데 Fig. 5.3은 가공 시 슬러리가 처지는 현상과, MAF가공위치별 가공결과를 나타낸 사진이다. Fig. 5.3 A는 슬러리가 아래로 처지는 현상을 나타낸 사진이고, B와 C는 슬러리를 12시 방향과 3시 방향에 놓는 형태를 나타낸 개략도이다. B는 가공시간동안 슬러리가 아래로 처져 공작물의 중심으로 갈수록 연마가 잘되고, 균일한 가공면을 기대할 수 없다. C의 경우 슬러리가 아래로 처지는 것은 같으나, 회전하면서 균일하게 가공되어 B에 비해 균일한 가공면을 기대할 수 있다. 추가적으로 MAF에서 공작물만 회전하는 경우에 비해, 공작물의 회전에 진동가공하는 경우, 진폭만큼 더 넓은 범위가 가공되는 장점이있다. 따라서 이중공정 순차 하이브리드 가공에서는 Fig. 5.3의 B의 형태로 3시방향에 슬러리를 위치하고 진동을 주고 실험을 진행한다.

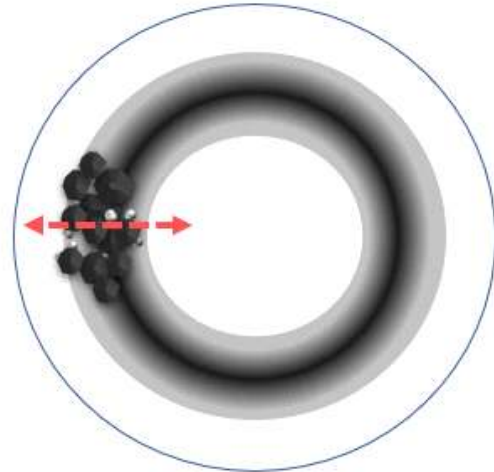




(A) Gravitational pull of slurry



(B) Slurry placed on top



(C) Slurry placed on side

Fig. 5.3 Characteristics in vertical MAF processing

## 나. 공작물 회전에 따른 PECP 특성

공작물이 회전함에 따라 기존의 PECP처럼 안정된 상태에서 전기화학적 반응이 일어나는 것이 아니고, 회전하기 때문에 특정 표면이 전해액에 침지되는 시간은 RPM에 따라 달라지고, 침지되는 시간에 따라 결과표면이 달라지기 때문에 이 현상에 대한 사전 연구가 필요하다. 공작물은 STS304재질에 0.4mm 두께의 15Φ 원판이다. Fig. 5.4는 회전 PECP의 개략도이다. 먼저 PECP를 Table 5.1의 전기적 조건으로 진행시키고 공작물을 회전시킨다. RPM은 Table 5.2의 조건으로 총 5번 진행하여 AFM CCD카메라로 표면을 확인한다. STS304 원판이 전해액에 담겨있는 넓이는 1,908mm<sup>2</sup>이고, 회전 PECP되는 영역의 넓이는 7,853mm<sup>2</sup>이다. 넓이차가 약4배이므로 회전 PECP 시간은 기존 PECP 가공시간 180초에 4배를 곱한 720초가 된다. PECP 진행중 표면이 연속적으로 전해액에 있는 시간은 Point 1이 100° 회전하는 시간을 기준으로 계산하였다.

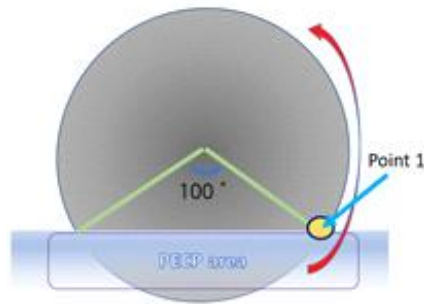


Fig. 5.4 Schematic diagram of polishing area (front view)

Table 5.1 Electrical condition of rotational PECP

Current density	0.47 A/cm <sup>2</sup>
Electrode gap	5 mm
Frequency	425 Hz
Duty factor	50%
PECP time	720s

Table 5.2 The time workpiece is immersed in the electrolyte according to RPM

RPM	0.5, 2, 3.5, 14, 60	
RPM	Single point continuous processing time	Total number of rotations of one point
0.5	33s	6
2	8s	24
3.5	4s	42
15	1s	180
60	0.27s	720

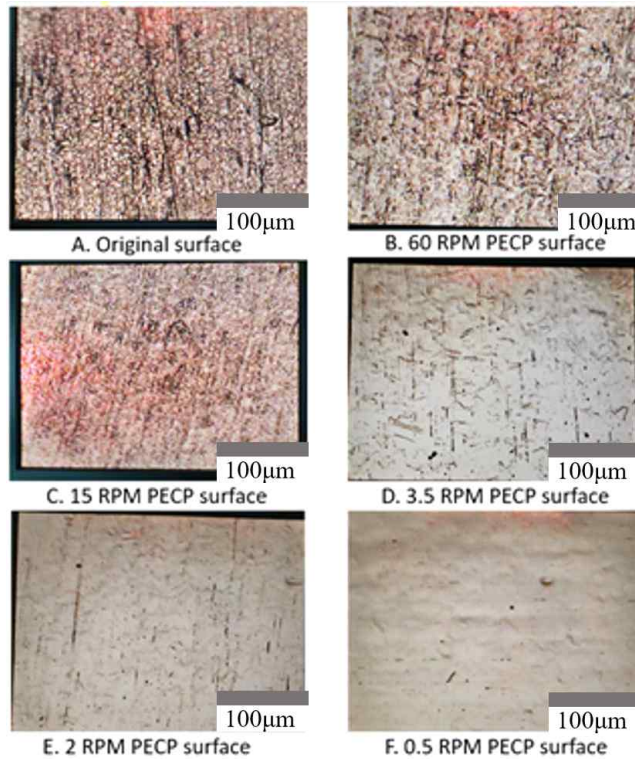


Fig. 5.5 CCD camera view according to work-piece RPM

Fig. 5.5의 A. STS304 가공 전 표면을 보면 세로방향으로 소재 가공시에 발생한 선이 관찰되고 입계부식이 발생한 것이 확인된다. 60RPM으로 가공물을 회전시키며 PECP 진행한 B표면은 원래 표면과 크게 차이가 없으나 부분적으로 용해되어 가공선이 희미해진 것이 보인다. 15RPM으로 회전하며 PECP진행한 C표면은 가공선이 점점 희미해지는 것이 관찰된다. RPM을 급격히 줄인 3.5 RPM에서 PECP한 D표면에서는 A,B,C표면에 비해 확연히 용해된 것이 관찰된다. E표면은 가공선이 거의 보이지 않고, 가장 RPM이 낮은 F표면에서는 가공선이 보이지 않을 정도로 용해되었다. 기존 PECP 진행된 표면과 가장 흡사한 표면은 F이고, 가공물을 보면 A에서 C까지 표면에 광택이 나지 않고, D에서 F로 갈수록 광택이 나는 것이 확인된다. 위의 결과로 RPM이 낮을수록 전기화학적 용해가 잘 이루어진다고 볼 수 있다. Fig. 5.4의 Point 1이 RPM이 낮아질수록 전해액에 담겨있는 시간이 길어지고, 전해액에 다시 들어가는 횟수는 작아진다. 위의 결과를 바탕으로 결론을 내리면, PECP가 진행되는 횟수보다 전해액에 담겨있는 시간이 길수록 용해가 잘된다. 따라서 RPM이 낮을수록 PECP가 잘 이루어진다.

## 다. 이중공정 순차 하이브리드 가공의 공작물 회전속도 고찰

이중공정 순차 하이브리드 가공에서 이전 실험과 다르게 추가된 가공영향 인자는 공작물의 회전속도(RPM)이다. 사전실험의 결과처럼 MAF는 슬러리가 탈락되기 때문에 공작물 회전속도가 느려야하고, PECP는 공작물이 전해액에 침지되는 시간이 길어져야 전기화학적 가공이 잘 일어나기 때문에 공작물의 회전속도가 느려야한다. 기존의 MAF에서는 공작물의 회전속도가 가공정도에 직접적인 영향을 미치지 않기 때문에 회전속도가 융합방식처럼 느리면 안되지만, 본 실험에서는 진동을 추가하여 공작물의 회전속도에 의한 가공성을 대체했다. 따라서 본 연구에서는 위의 두 가지 이유로 공작물의 회전속도를 0.5RPM으로 고정하여 실험했다.

## 2. 연마입자 크기에 따른 순차 하이브리드 가공특성

본 실험은 3장의 PECP->MAF 교차가공에서 보이는 낮은 표면거칠기 값과 Micro-pit가 없는 표면 혹은 더 높은 품질의 표면이 얻어지는지 확인하기 위한 실험이다. 먼저 이전 실험에서 회전하며 PECP를 진행하는 경우 기존 PECP보다 전기화학적 반응이 덜 일어나기 때문에, 사전실험에 비해 가공영역을 줄여 전류밀도를 높여서 하이브리드 가공을 진행했다. 가공영역은 13mm만큼 전해액에 잠긴 넓이가 폴리싱된다. 폴리싱 영역의 넓이는  $13\text{mm}^2$ 이고, 가공영역의 4.5배가 전체 가공영역이기 때문에 이전 PECP연구에서 180초가 폴리싱 기준시간으로 적합하기 때문에, 원판 전체 가공시간은 180초의 4.5배인 810초로 진행했다. Fig. 5.6은 공작물에서 PECP가 진행되는 영역을 나타낸 개략도이다. 실험조건은 Table 5.3과 같이 진행했다. Fig. 5.7은 공작물의 CCD카메라 관찰 위치 및 AFM 측정 위치를 나타내었다. 여기서 공작물의 9시 방향은 MAF가 마지막으로 진행되고 공정이 끝난 표면이기 때문에 입자에 의한 Scratch mark가 반드시 발생한다. 따라서 9시 방향 표면은 측정 표면에서 제외한다. 전해액에 침지된 6시 방향의 표면 또한 전기화학반응이 진행된 시간이 짧으므로 Micro-pit가 발생하며 이 표면 또한 목적표면과 거리가 멀기 때문에 제외한다. 두 영역을 제외한 표면에서 MAF와 PECP가 순차 하이브리드 가공된 영역 내에 공작물 끝단에서 10mm 위치에 마커로 표시하고, 마커 근처  $300\mu\text{m}$ 이내의 영역에서 12시, 3시, 6시, 9시 방향 표면을 관찰하고 대표되는 표면을 관찰하고, 측정하였다.

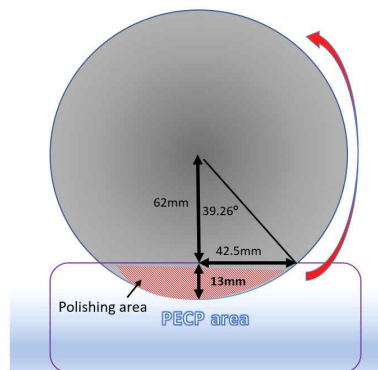


Fig. 5.6 Schematic diagram of PECP area

Table 5.3 Experimental condition of controlled application of process mechanisms hybrid machining according to abrasive particle size

Electrical condition	
Current density	0.5 A/cm <sup>2</sup>
Electrode gap	5 mm
Frequency	425 Hz
Duty factor	50%
Polishing time	810s
MAF condition	
Abrasive slurry mixing ratio (7:1)	
Magnetic particle	1.75g (STS304 powder)
WA	0.25g - 0.5μm, 1.5μm, 3~5μm
Lubricant	2.5ml
Vibration Hz	15Hz

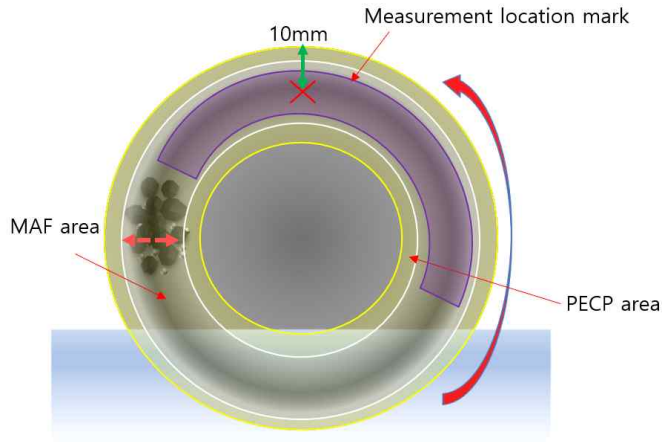


Fig. 5.7 Measurement area

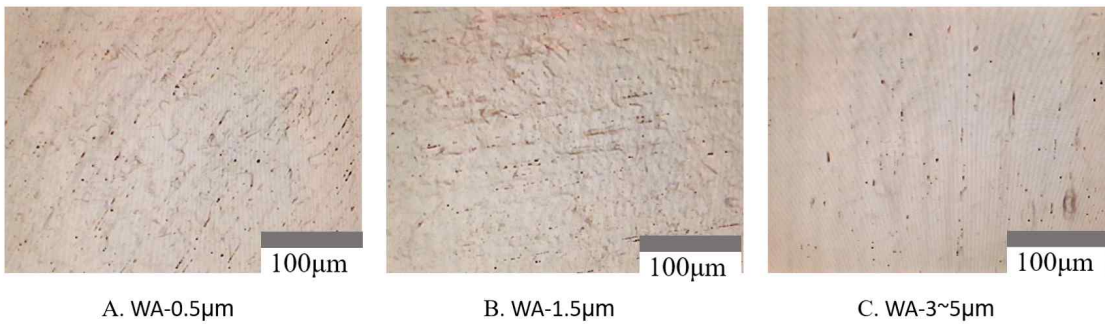


Fig. 5.8 CCD camera view according to abrasive particle size

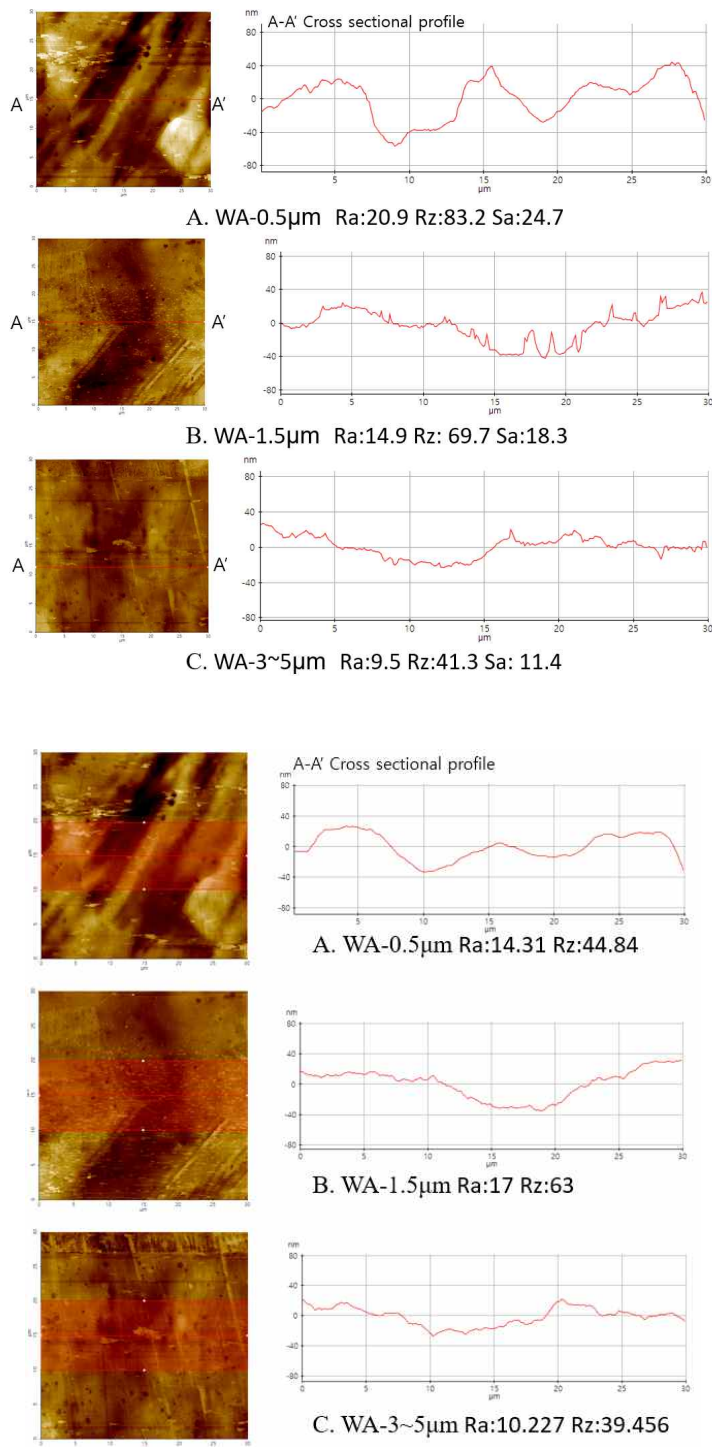


Fig. 5.9 AFM images of surface according to abrasive particle size

Fig. 5.7는 각 연마입자크기에 따른 순차 하이브리드 가공 표면의 CCD 카메라 화면 이고, Fig. 5.8는 AFM 측정결과를 나타낸 것이다. 먼저 CCD카메라를 보면 A는 표면에 입자에 의한 스크래치마크가 보이지 않고, 평활한(Smoothness)표면을 보이지만, AFM 측정 이미지에서 확인될 정도로 표면에 큰 표면과형이 보인다. Fig. 5.8의 A를 보면 단면선도에서도 평활하지만 평탄하지 않고 파상도가 큰 단면선도가 관찰된다. Fig. 5.8의 B를 보면 큰 표면과형은 보이지 않지만, 부분적으로 거친표면이 보인다. Fig. 5.8 B를 보면 입자에 의한 스크래치마크가 부분적으로 분포되어있지만, A보다 평탄한 표면을 보인다. 이는 Ra, Sa값으로도 확인할 수 있다. 이 측정결과로 CCD카메라 화면과 같은 형태의 표면이 측정됨을 확인할 수 있다. Fig. 5.8 C는 3~5 $\mu\text{m}$  크기의 연마입자를 사용한 가공결과 표면이다. A, B, C중 가장 평탄한 표면으로 보인다. Fig. 5.8 C를 보면 단면선도와 Ra, Sa값에서도 평탄한 표면을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 하지만 평활화가 잘된 A표면에 비해 단면선도에 요철(凹凸)부가 보인다. 하지만 B에 비해 요철(凹凸)부가 적다. 하지만 세 가공결과 모두 전기화학적 반응에 의한 Micro-pit가 AFM 측정 이미지에서 관찰된다. Fig. 5.8에서 각 조건에 따른 표면을 면의 범위에서 측정하여 같은 경향을 나타내는 것을 확인했다. 또 순차적으로 가공이 되었지만 PECP만 진행된 표면처럼 광택이 관찰되었고, Fig. 5.9는 순차 하이브리드 가공한 표면과 가공 전 표면의 광택정도를 비교한 사진이다.

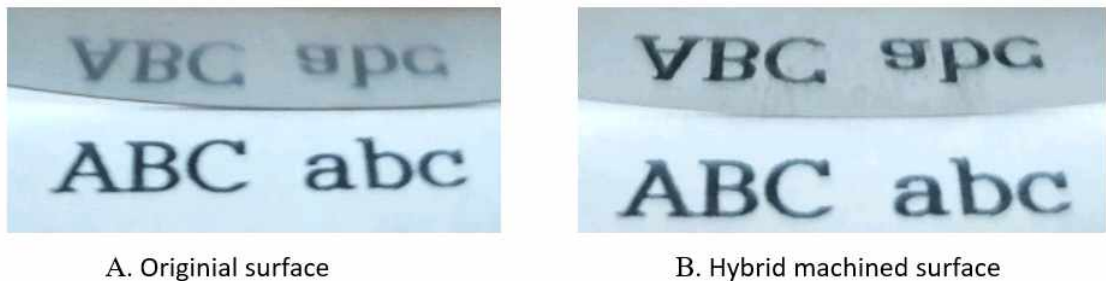


Fig. 5.10 A comparison of surface glosses



### 3. 가공시간에 따른 하이브리드 가공특성

본 실험은 순차 하이브리드 가공시간에 따른 표면을 확인하기 위한 실험이다. PECP는 특정 가공시간이 지나면 표면에 유의미한 변화가 관찰되지 않지만, MAF의 경우 가공시간이 길어짐에 따라 표면이 점점 평탄화되기 때문에 순차 하이브리드 가공에서도 가공시간에 따라 표면의 품질이 높아질것으로 생각된다. 따라서 본 실험에서는 가공영역으로 계산한 전체 하이브리드 가공시간 810초를 기준으로 405, 1215, 1620초 진행한 표면을 CCD카메라로 관찰했다. 나머지 실험조건은 Table 5.4에 나타내었다.

Table 5.4 Experimental condition according to controlled application of process mechanisms hybrid machining time

<b>Electrical condition</b>	
Current density	0.5 A/cm <sup>2</sup>
Electrode gap	5 mm
Frequency	425 Hz
Duty factor	50%
Polishing time	405, 810, 1215, 1620s
<b>MAF condition</b>	
Abrasive slurry mixing ratio (7:1)	
Magnetic particle	1.75g (STS304 powder)
WA	3~5μm
Lubricant	2.5ml
Vibration Hz	15Hz

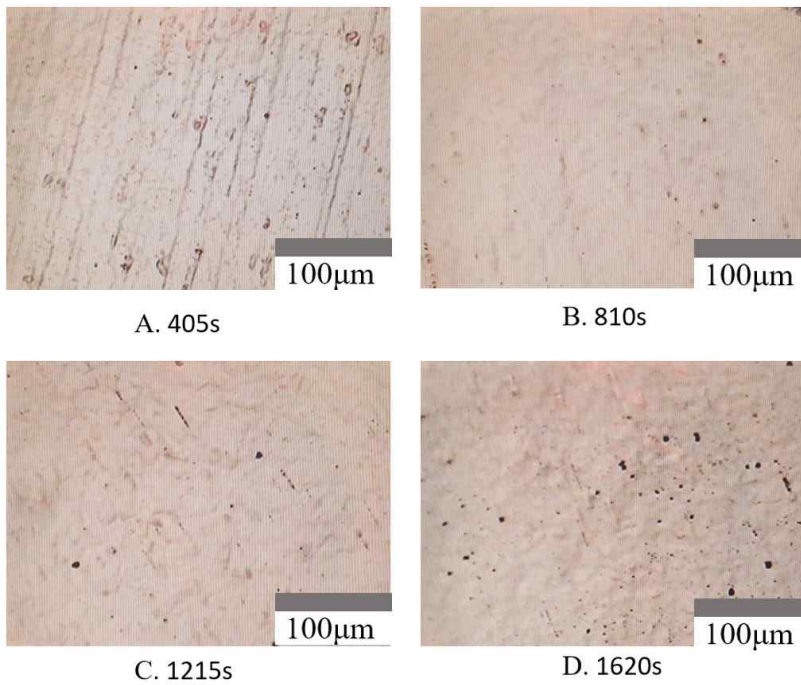


Fig. 5.11 CCD camera view according to hybrid machining time

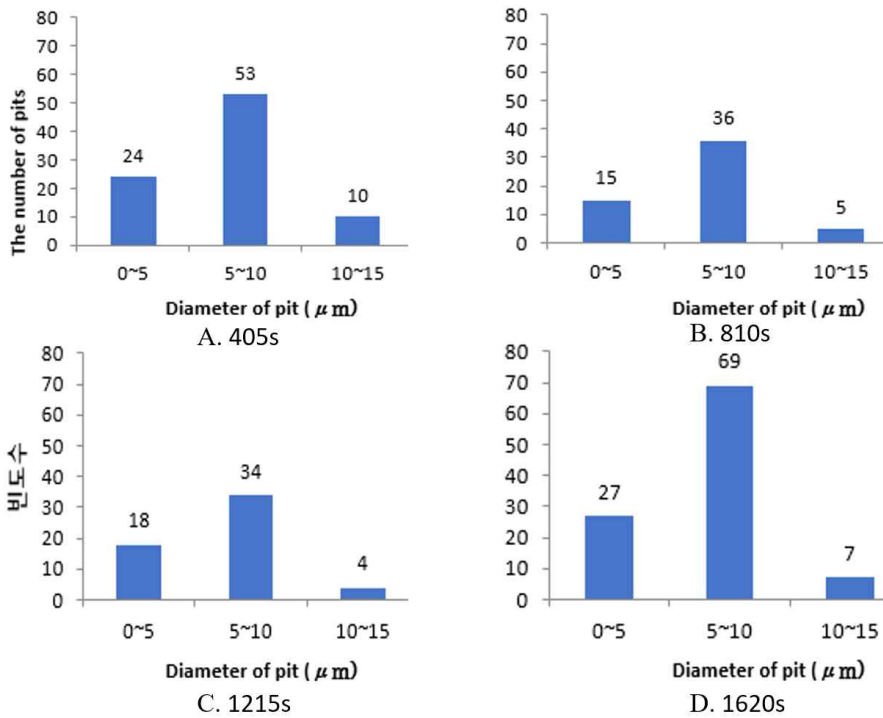


Fig. 5.12 Surface defects histogram according to machining time

Fig. 5.10은 하이브리드 가공시간에 따른 CCD카메라 화면을 나타내었다. A. 405초 진행한 표면은 가공영역을 기준으로 MAF, PECP가 27초씩 3번 순차 가공되었다고 볼 수 있으며, 3장 1절 3. 시간에 따른 PECP 실험에서 60초 진행한 표면과 비슷하다. B. 810초 진행한 표면은 A에서 보이는 가공 흔적이 보이지 않고, 큰 Pit가 거의 관찰되지 않고, Micro-pit도 거의 없다. C. 1215초 하이브리드 가공 진행한 표면은 B에서 보이지 않는 특정 방향으로 작은 Pit들이 관찰되고, D에서는 작은 Pit와 405초에 큰 Pit와 형태가 다른 Pit가 관찰된다. 위의 CCD카메라 화면으로 보았을 때 순차 하이브리드 가공시간이 기준시간이상으로 길어지면 MAF에 의해 표면에 Pit가 생성되는 것으로 생각되고, 이는 MAF와 PECP의 가공속도가 다르기 때문에 발생하는 문제로 생각된다. 여기서 3장 교차가공에서 MAF가 전기화학적 반응을 일으킨 표면의 Micro-pit를 제거한 것과 순차 하이브리드 가공에서 가공시간이 길어짐에 따라 표면에 발생하는 Pit를 구분해서 보아야 한다. Micro-pit는 전기화학적 반응으로 인해 생긴 Pit이고 5 $\mu$ m이내의 크기인 반면, 순차 하이브리드 가공에서 가공시간이 길어짐에 따라 발생한 Pit는 5 $\mu$ m보다 크다. 이미지 분석으로 피트를 나타낸 Fig. 5.10을 보면 810초, 1215초 표면이 405초에 비해 결점이 적고, 1620초 진행한 표면은 오히려 결점의 수가 증가한다. 기준가공 영역에 PECP 180초 진행한 것으로 계산한 전체 표면 가공시간 810초가 적절한 하이브리드 가공시간으로 판단된다.

## 제4절 이중공정 순차 하이브리드 가공특성 고찰

이중공정 순차 하이브리드 가공은 교차가공에서 높은 품질을 얻는것에 착안하여 두 공정을 한 기기에서 진행하여 두 가공방식의 이점을 모두 얻기위한 융합방식이다. 회전상태로 두 가공방식이 순차적으로 계속 진행되기 때문에, 회전에 의해 달라지는 각 가공방식의 특징이 하이브리드 가공의 주요한 영향 인자이다. 주요 인자 중 공작물의 RPM은 전체 가공결과에 영향을 주는 인자로서, 사전실험을 통해 RPM이 낮을수록 두 가공방식 모두 성능이 높아지지만, 회전함에 따라 두 공정이 교차되는 횟수가 늘어나기 때문에 슬러리가 탈락되지 않는 범위에서 높은 속도의 RPM이 적합하다. 현 실험장치에서는 0.5RPM으로 진행하였으나, 자석의 자기력을 높이거나 입자의 마찰을 줄이는 방법이 RPM을 높이는 방안이 될 수 있다. 또한 PECP의 RPM을 높이기 위해서 전해액에 침지되는 범위를 늘리면 표면이 전해액에 침지되는 시간이 길어지기 때문에 공작물의 회전속도가 빨라도 전기화학적 반응을 높일 수 있다. 동시에 넓은 범위가 침지되기 때문에 파워서플라이에서 높은 전류의 전원이 인가되어야한다.

이중공정 순차 하이브리드 가공표면을 보면 3장 교차 가공에서 PECP->MAF 표면은 전기화학적 반응으로 인한 Micro-pit가 기계적가공에 의해 제거되어 측정표면에서 Micro-pit가 보이지않지만, 순차 하이브리드 가공의 경우 입자크기에 관계없이 모든 표면에서 Micro-pit가 관찰되었다. 이는 결과표면이 하이브리드 가공 마지막 순서에 PECP를 거치기 때문에 생기는 것으로 생각된다.

입자크기에 따른 결과를 분석해보면, 0.5 $\mu$ m크기의 연마입자를 사용한 경우 AFM 측정 표면에 스크래치마크가 보이지 않고, 파상도가 큰 것을 알 수 있다. 4장 1절의 자기입자에 따른 Fn값을 비교해보면 STS304 powder가 Iron particle 45 $\mu$ m와 비슷한 자기력을 가지기 때문에, 3장 3절 Iron particle 45 $\mu$ m에 WA 0.5 $\mu$ m로 가공한 표면과 같은 양상의 표면을 보인다고 볼 수 있다. 이 결과표면은 자기입자의 자기력이 작고, 연마입자도 작아서 CCD카메라에서 육안으로 입자에 의한 가공흔적이 보이지 않고, AFM으로 측정했을 때 작은 가공폭과 깊이의 단면도가 관찰되었다. 순차 하이브리드 가공의 경우 MAF와 PECP가 순차적으로 계속 진행되기 때문에 표면의 작은 가공흔적이 계속해서 전기화학적으로 용해되며 최종 결과표면에서 관찰되지 않은 것으로 보인다. 1.5 $\mu$ m크기의 연마입자로 진행한 순차 하이브리드 가공표면의 경우 연마입자에 의한 요철(凹凸)부가 관찰된다. 3~5 $\mu$ m 크기 연마입자로 진행한 순차 하이브리드 가공표면은 A와 평활

도와 B의 평탄한 표면 사이에 있다고 볼 수 있고, 단면선도에서 B의 요철(凹凸)부가 용해된 것으로 보이는 단면선도를 보인다. 하지만 측정표면에서 얻은 가공흔적이 관찰되는 것으로 볼 때 PECP와 MAF의 특징이 모두 보인다. 3장의 교차가공에서는 작은 연마입자를 이용하여 Micro-pit를 제거하는데 목적이 있었으나, 순차 하이브리드 가공에서는 융합가공 장치의 특성상 Micro-pit가 생기기 때문에 MAF로 Micro-pit를 제거하는 방식보다 큰 연마입자를 이용해 PECP의 단점인 표면의 평탄화를 해결하는 것이 적절해보인다. 따라서 3~5 $\mu\text{m}$  크기 연마입자가 순차 하이브리드 가공에서 적절하다고 생각된다. Fig. 5.11은 MAF에서 표면형태에 따른 가공 메커니즘을 나타낸 개략도이다.[43] Fig. 5.11처럼  $F_c$ 가 충분하지 못한 경우 Valley에 연마입자가 부딪히며 모멘트가 발생하고, 이 경우에 공작물을 제대로 가공하지 못한다. 슬러리가 Hill에 위치하는 경우 접선방향 힘에 의해 끝단이 가공되어 표면의 평탄화가 진행된다.

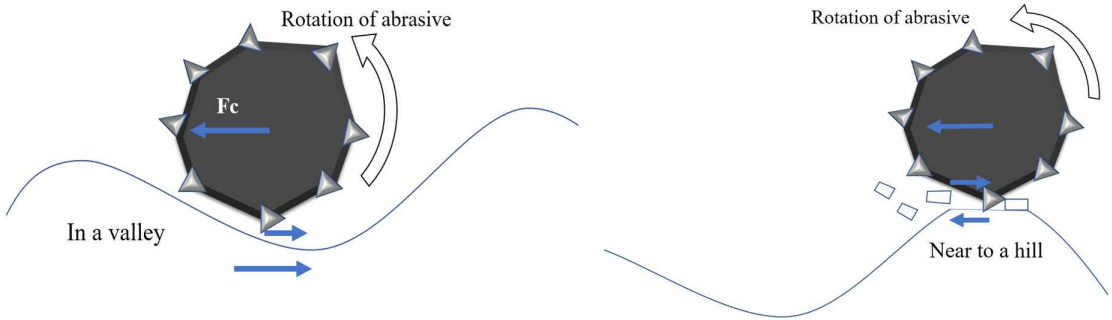


Fig. 5.13 Mechanism of magnetic abrasive finishing

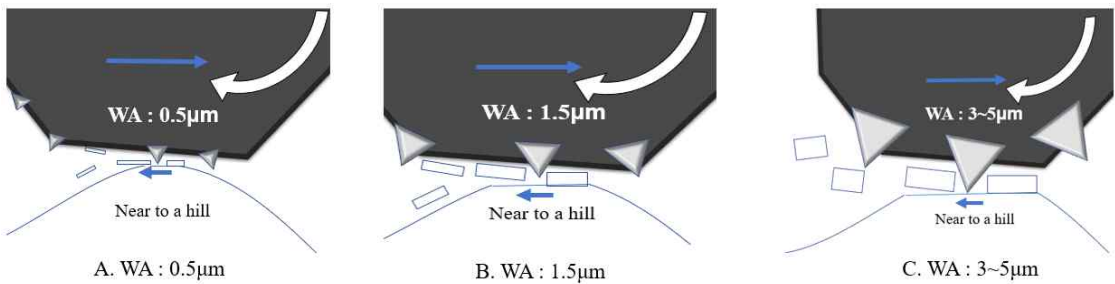


Fig. 5.14 Flattening mechanism according to abrasive particle size

Fig. 5.12은 연마입자 크기에 따른 표면 평탄화 메커니즘을 나타내는 개략도이다. Fig. 5.8 입자에 따른 순차 하이브리드 가공 결과를 분석해보면, A의 경우 연마입자가 작아 표면을 평탄화하지 못하고 표면에 스크래치마크를 내는 정도에 그친다. B의 경우 표면 평탄화에도 영향을 미치고, 부분적으로 거친 표면을 나타낸다. C의 경우 큰 연마입자를 사용하기 때문에 Hill의 끝단을 가공하여 표면 평탄화에 영향을 미치지만 자기입자의 자기력이 작아 큰 연마입자가 깊이 파고들지 못한다. 따라서 Fig. 5.8가 Fig. 5.12의 메커니즘에 따라 표면이 나왔다고 볼 수 있다.

하이브리드 가공시간에 따른 특성을 보면 시간이 짧은 경우 표면이 전기화학적 반응이 충분히 일어나지 못해서 가공전 표면의 소재 가공선이 보이고 큰 Pit들도 관찰된다. 가공시간이 기준시간보다 길어지면 전기화학적 반응은 마무리되고, 자기입자가공은 계속해서 표면을 가공하기 때문에 기준시간 동안 하이브리드 가공한 표면보다 Pit가 더 많이 관찰된다. 이는 안정된 산화막이 깊은 골을 다채우고, 높은 산을 이미 용해되어 낮아졌기 때문에 810초 이후에 표면에 스크래치를 내면 이 스크래치를 쉽게 채우지 못하는 것으로 보인다. 따라서 MAF의 경우 PECP시간에 맞추어 가공이 마무리 되어야 하고, MAF의 효율을 높이기 위해서는 진동 Hz를 높이거나, PECP의 기준시간을 늘려 MAF가공시간을 늘리는 방법이 필요하다.

이중공정 순차 하이브리드 가공의 경우 MAF와 PECP 모두 큰 범위의 가공을 하기 어려운 특징이 있다. 본 연구의 융합방법으로 진동과 공작물의 회전을 이용하여 넓은 범위의 표면가공을 기존의 MAF에 비해 짧은 시간에 가공가능하고, 기존 PECP에 비해 넓은 크기의 표면을 폴리싱 할 수 있는 점이 장점이다. 하지만 장치의 특성상 마지막에 가공되는 방식이 PECP로 특정되며, PECP의 시간이 짧아 Micro-pit가 발생하는 단점이 있다.

## 제6장 결론

본 연구에서는 MAF의 가공특성과 PECP의 가공특성이 충분히 상호보완 될 것으로 보이는 단편적인 실험들과, 하이브리드 가공 방식을 바탕으로 연구를 진행하였고, 총 세 가지 실험을 진행했다. 첫 번째 실험은 MAF와 PECP를 각각 진행하고, 각 특성을 확인한 뒤, MAF진행한 표면에 PECP를 진행하거나, PECP진행한 표면에 MAF를 진행하는 교차가공을 진행하고 기초특성을 분석했다. 이 실험에서 두 가지 결론을 얻을 수 있다. PECP 진행한 표면은 표면이 평활화된 상태이기 때문에, PECP진행한 표면에 MAF를 하는 경우, 자기입자가 크거나, 연마입자가 큰 것이 반드시 좋은 결과표면이 나타나는 것은 아니며, 오히려 작은 연마입자로 진행하거나, 작은 자기입자로 가공하는 것이 표면의 품질을 높일 수 있으며, PECP로 인한 Micro-pit가 연마입자에 의해 기계적으로 가공되어 사라진 표면을 확인하였다. MAF진행한 표면에 PECP를 진행하는 경우 기존 PECP시간보다 적은시간에 10nm Ra 이하 30nm Rz이하의 표면을 얻을 수 있었고, MAF의 특징인 입자에 의한 스크래치 마크가 사라진 표면을 확인하였다. 이를 통해 MAF와 PECP는 하이브리드 가공 시 높은 품질의 표면을 얻을 수 있는 가능성을 확인하였다.

두 번째 실험에서는 MAF와 PECP를 동시에 진행하는 Combined hybrid machining의 형태로 실험장치를 만들어 가공을 진행하였다. 가공의 결과표면은 MRR값은 높았지만, Ra, Rz값이 원래 표면과 차이가 없거나 더 낮은 품질의 표면을 보였다. 또 표면에 광택이 나지 않았다. 이 실험으로 두 가지 결론을 얻을 수 있다. 첫 번째는 표면의 MRR값이 PECP만 진행한 표면, MAF만 진행한 표면, PECP→MAF 진행한 표면, MAF→PECP진행한 표면과 비교하였을 때 더 많은 재료제거가 일어났으므로, PECP의 전기화학적 반응이 MAF의 기계적 가공의 재료제거율을 향상시킨다. MAF의 경우 30분 가공 시 6 $\mu$ m의 가공 깊이를 보이기 때문에 동시 하이브리드 가공시간인 3분에서 MAF의 가공깊이는 무시가능한 수치이고, ECP와 비교했을 때 1.43~1.83배의 재료제거율을 보인다. 하지만 표면의 품질면에서 보면 광택이 없고, 표면거칠기가 높기 때문에 원하는 품질의 표면을 얻었다고 보기 힘들고, 이 원인으로서는 연마입자가 Anode와 Cathode사이에 위치하며, 공작물과 접촉한 연마입자가 양극의 역할을 하고 입자의 접촉면이 넓기 때문에 전류를 분산시키는 역할을 하고, 슬러리가 공작물을 막아 전기적 저항의 역할을 한다고 볼 수 있다. 이 추측은 가공 후 연마입자의 관찰을 통해 확인하였다. 따라서

MAF는 PECP에 악영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 MAF가 PECP의 전기화학적 반응에 간섭하지 않으면서 두 공정의 장점을 모두 취하기 위해 세 번째 실험장치를 고안하였다.

세 번째 실험장치는 Controlled application of process mechanisms 하이브리드 가공의 형태로, 한 장치에서 두 공정을 진행하지만, 두 공정의 가공영역은 다르고, 전체 공정 체인에 변화를 준 융합방식이다. 여기서 가공물의 형태를 원판으로 바꾸어 회전시키며 MAF와 PECP가 전체 가공시간동안 계속해서 순차로 가공되게 설계하였으며, 이 실험의 결과표면은 광택이 나고, 전기화학적 반응이 잘 일어난 것으로 보이며, 동시에 MAF에 의해 기계적 가공의 흔적이 보이는 결과를 얻었다. 이를 통해 얻을 수 있는 결론은 두가지 결론을 얻을 수 있다. PECP와 MAF의 가공장소를 일치시키지 않고, 두 가공과정을 순차로 진행하며 결과표면에서 전기화학적 반응과 입자에 의한 스크래치마크를 확인할 수 있다. 이 표면은 교차가공의 결과표면과 비슷한 표면을 보이고, Ra : 10nm대의 평탄한 표면을 얻었다. 본 실험의 결과표면에서 나타나는 MAF 입자에 의한 스크래치 마크는 첫 번째 실험에서 보이는 스크래치 마크처럼 가공 깊이가 깊지 않고, 측정표면을 확인하여도 희미한 수준으로 MAF된 표면이 지속적으로 PECP되기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 보이고, 이는 기존 스크래치 마크가 있는 표면보다 품질이 좋다고 볼 수 있다. 순차 하이브리드 가공에서는 MAF 가공이 PECP의 단점인 Micro-pit를 없애기 위해 작은 연마입자를 사용하는 것이 아닌, 표면 파상도를 줄이는 평탄화를 목적으로 큰 연마입자를 사용하는 것이 적절하다고 생각된다. 순차 하이브리드 가공을 통해 기존의 MAF에 비해 짧은 시간에 높은 품질의 표면을 얻을 수 있고, 기존 PECP에 비해 넓은 표면을 빠른시간에 높은 품질로 가공가능하다. 또 순차 하이브리드 가공의 기준시간은 침지된 면적을 기준으로 180초가 적절하다고 생각되고, 기준시간보다 길게 가공하는 경우 MAF가 가공입자에 의해 Pit를 발생시키고, 기준시간보다 짧으면 표면에 평활도와 평탄도가 부족한 표면이 관찰된다.

위 세 가지 실험을 종합하여 보면 전기화학적 가공과 기계적 가공은 상호 긍정적인 효과를 낼 수 있으며, PECP의 전기적 특성 때문에 가공장소를 일치시키는 것은 전체적인 가공성 저하요소가 될 수 있다. 본 연구인 MAF와 PECP의 하이브리드 가공에서는 두 공정을 한 장치에서 진행하고, 가공시간 동안 계속해서 교차로 가공되는 이중공정 순차 하이브리드 가공방식이 적합하다고 판단된다.



## REFERENCE

1. 대한민국 정책브리핑 – Korea.kr
2. Rudrapati, R. (2018). Machining of stainless steels and alloys using non-traditional machining processes. In *Stainless Steels and Alloys*. IntechOpen.
3. Lauwers, B., Klocke, F., Klink, A., Tekkaya, A. E., Neugebauer, R., & McIntosh, D. (2014). Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 63(2), 561-583.
4. Luo, X., & Qin, Y. (2018). *Hybrid Machining: Theory, Methods, and Case Studies*. Academic Press.
5. Singh, D. K., Jain, V. K., Raghuram, V., & Komanduri, R. (2005). Analysis of surface texture generated by a flexible magnetic abrasive brush. *Wear*, 259(7-12), 1254-1261.
6. Singh, P., & Singh, L. (2014). Optimization of magnetic abrasive finishing parameters with response surface methodology. In *Proceedings of the international conference on research and innovations in mechanical engineering* (pp. 273-286). Springer, New Delhi.
7. Shin, S, S. (2018). A study on the electrochemical machining of machining direction controllable electrode by external magnetic force
8. Kim, S. O., & Kwak, J. S. (2008). Improvement of Magnetic Force and Experimental Verification for Magnetic Abrasive Polishing of Aluminum Alloy. *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 17(5), 23-29.
9. Lee, G. H., (2019). Development of magnetic force applied electrochemical machining electrodes and devices for internal machining of workpiece. 2019한국생산제조학회 학술발표대회 논문집 126 – 126
10. Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2010). *Manufacturing, Engineering and Technology SI 6th Edition*-Serope Kalpakjian and Stephen Schmid: Manufacturing, Engineering and Technology.
11. Ganguly, V., Schmitz, T., Graziano, A., & Yamaguchi, H. (2013). Force Measurement and Analysis for Magnetic Field-Assisted Finishing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(4).

12. Jain, V. K., Saren, K. K., Raghuram, V., & Sankar, M. R. (2019). Force analysis of magnetic abrasive nano-finishing of magnetic and non-magnetic materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5-8), 1137-1147.
13. Shinmura, T., Takazawa, K., Hatano, E., & Aizawa, T. (1984). Study on Magnetic--Abrasive Process--Finishing Characteristics. *Bull. Jpn. Soc. Precis. Eng.*, 18(4), 347-348.,
14. Kanish, T. C., Narayanan, S., Kuppan, P., & Ashok, S. D. (2017). Investigations on the finishing forces in Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing of SS316L. *Procedia engineering*, 174, 611-620.
15. A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(4), 383-390.
16. Yin, S., & Shinmura, T. (2004). Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(12-13), 1297-1303.
17. Yamaguchi, H., Yumoto, K., Shinmura, T., & Okazaki, T. (2009). Study of finishing of wafers by magnetic field-assisted finishing. *Journal of advanced mechanical design, systems, and manufacturing*, 3(1), 35-46.
18. Stein, M., Yamaguchi, H., Morimoto, Y., Yoshimura, F., Hasegawa, A., & Takasugi, K. (2016, August). Magnetic abrasive finishing of non-axisymmetric curved surfaces using rotating magnetic tool. In *2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA)* (pp. 123-126).
19. Yamaguchi, H., Srivastava, A. K., Tan, M. A., Riveros, R. E., & Hashimoto, F. (2012). Magnetic abrasive finishing of cutting tools for machining of titanium alloys. *CIRP annals*, 61(1), 311-314.
20. Liu, G. Y., Guo, Z. N., Jiang, S. Z., Qu, N. S., & Li, Y. B. (2014). A study of processing Al 6061 with electrochemical magnetic abrasive finishing. *Procedia Cirp*, 14(2014), 234-238.
21. Shinmura, T., & Yamaguchi, H. (1995). Study on a new internal finishing process by the application of magnetic abrasive machining: internal finishing of stainless steel tube and clean gas bomb. *JSME international journal. Ser. C, Dynamics, control,*

- robotics, design and manufacturing, 38(4), 798-804.
22. Jayswal, S. C., Jain, V. K., & Dixit, P. (2005). Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(5-6), 477-490.
  23. Li, W., Li, X., Yang, S., & Li, W. (2018). A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: Material removal behavior and finishing performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 260, 20-29.
  24. Wang, R., Lim, P., & Mun, S. D. (2017). Magnetic abrasive finishing for inner surface of Al 6063 pipe: Experimental investigations. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 3, 1178-1185.
  25. Wang, D., Shinmura, T., & Yamaguchi, H. (2004). Study of magnetic field assisted mechanochemical polishing process for inner surface of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic components: finishing characteristics under wet finishing using distilled water. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(14), 1547-1553.
  26. Patil, M. G., Chandra, K., & Misra, P. S. (2012). Study of mechanically alloyed magnetic abrasives in magnetic abrasive finishing. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(10), 1-5. 2017. 2014.
  27. "Effect of the magnetic pole arrangement on the surface roughness of STS 304 by magnetic abrasive machining." *International journal of precision engineering and manufacturing* 15.7 (2014): 1275-1281.
  28. Kang, J., George, A., & Yamaguchi, H. (2012). High-speed internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing. *Procedia CIRP*, 1, 414-418.
  29. Givi, M., Tehrani, A. F., Mohammadi, A., & Vahdati, M. (2017). Experimental Study on Vibration-Assisted Magnetic Abrasive Finishing for Internal Surface of Aluminum Tubes. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 11(1), 49-60.
  30. Yamaguchi, H., Shinmura, T., & Kobayashi, A. (2001). Development of an internal magnetic abrasive finishing process for nonferromagnetic complex shaped tubes. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 44(1), 275-281.
  31. Yin, C., Heng, L., Kim, J. S., Kim, M. S., & Mun, S. D. (2019). Development of a

- new ecological magnetic abrasive tool for finishing bio-wire material. *Materials*, 12(5), 714.
32. Ridha, M. M., Zou, Y. H., & Sugiyama, H. (2015). Development of a new internal finishing of tube by magnetic abrasive finishing process combined with electrochemical machining. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 3(2), 22-29.
  33. 宮本岩男, & 谷口浮. 加工技術データファイル基礎編 「特殊加工」,(財) 機械振興協会技術研究所 (2003) 95. The Japan Society of Mechanical Engineers ナノスケール機械加工と化学エッチングを併用した, 3.
  34. Lee, S. J., Lee, Y. M., & Du, M. F. (2003). The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 280-286.
  35. Rajurkar, K. P., Kozak, J., Wei, B., & McGeough, J. A. (1993). Study of pulse electrochemical machining characteristics. *CIRP annals*, 42(1), 231-234.
  36. Nakar, D., Harel, D., & Hirsch, B. (2018). Electropolishing effect on roughness metrics of ground stainless steel: a length scale study. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 6(1), 015003.
  37. Ruszaj, A., Zyburka, M., Żurek, R., & Skrabalak, G. (2003). Some aspects of the electrochemical machining process supported by electrode ultrasonic vibrations optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(10), 1365-1371.
  38. Park, J. W., & Lee, D. W. (2009). Pulse electrochemical polishing for microrecesses based on a coulometric analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(7-8), 742-748.
  39. Kim, Y. B., & Park, J. W. (2012). Corrosion Rate Evaluation of Pulse Electrochemical polishing for stainless steel. *Advanced Science Letters*, 14(1), 227-230.
  40. Kim, U. S., & Park, J. W. (2019). High-quality surface finishing of industrial three-dimensional metal additive manufacturing using electrochemical polishing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(1), 11-21.
  41. Guo, C., Qian, J., & Reynaerts, D. (2017). Electrochemical machining with scanning

- micro electrochemical flow cell (SMEFC). *Journal of Materials Processing Technology*, 247, 171-183.
42. Omori, H., & Nakagawa, T. (1990). Grinding with electrolytic in-process dressing. *Denkai in-process dressing kensakuho*.
  43. Mori, T., Hirota, K., & Kawashima, Y. (2003). Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism. *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 682-686.
  44. Kim, Y. B., Park, J. W. (2011). A Study of Electric Process Conditions for Local Surface Properties Analysis by Pulse Electrochemical Polishing, 166-166.
  45. Kim, Y. B., Kim, J. T., Ahn, D. G., Park, J. R., Jeong, S. H., & Park, J. W. (2012). AFM based Surface Verifications of Pulse Electrochemical Polishing for Various Frequency Conditions. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 21(2), 246-251.
  46. Kim, U., Kim, Y., & Park, J. (2013). Vibration Electrochemical Polishing for localized surface leveling. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 30(2), 148-153.
  47. 정윤준, 박정우 (2013). TNL을 이용한 알루미늄 재질 마이크로 몰드 제작에 관한 연구. *한국생산제조학회 학술발표대회 논문집*, 130-130
  48. Rasband WS. *ImageJ*. Bethesda, MD, USA: U.S National Institutes of Health; 2009. Available: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.