



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](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

알루미늄 소재의 전자연마 공정에서 가공 특성 평가 및 최적화에 관한 연구



기계공학과

손 출 배

공 학 박 사 학 위 논 문

알루미늄 소재의 전자연마 공정에서 가공 특성 평가 및 최적화에 관한 연구

지도교수 곽 재 섭

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2020년 2월

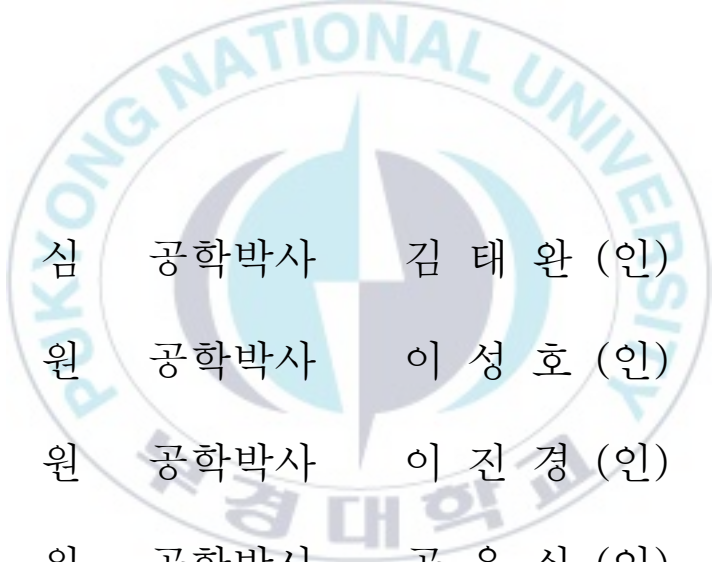
부 경 대 학 교 대 학 원

기계공학과

손 출 배

손출배의 공학박사 학위논문을 인준함.

2020년 2월 21일



주	심	공학박사	김 태 완 (인)
위	원	공학박사	이 성 호 (인)
위	원	공학박사	이 진 경 (인)
위	원	공학박사	공 유 식 (인)
위	원	공학박사	곽 재 섭 (인)

목 차

Nomenclature	iv
List of tables	vi
List of figures	viii
List of photographs	xi
Abstract	xii
1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 국내외 연구동향	6
1.3 연구 목적 및 내용	8
1.4 연구 논문의 구성	10
2. 이론적 배경	12
2.1 자기연마 가공	12
2.1.1 자기연마 가공의 원리	12
2.1.2 자기연마 가공의 한계점	16
2.2 전자연마 가공	20
2.2.1 전자연마 가공의 구성 및 개념	20
2.2.2 전자연마 가공 메커니즘	23
2.3 회색관계 분석법	28
2.3.1 회색시스템 이론	28
2.3.2 회색관계 분석	29

2.3.3 회색관계 형성	31
2.3.4 회색관계 계수 및 회색관계 등급	34
3. 전자연마의 자기장 분포 시뮬레이션	37
3.1 작업공간에서 자기장 분포	37
3.1.1 실험계획 및 구성	37
3.1.2 시뮬레이션 경계조건	40
3.1.3 시뮬레이션 분석 결과	43
3.2 극성변화에 따른 자기장 분포	53
4. 전자연마 표면가공 특성 평가 및 최적화	59
4.1 실험장치 및 계측방법	59
4.2 연마 핀과 가공 시간에 따른 영향 분석	67
4.2.1 실험의 구성	67
4.2.2 평가 결과	69
4.3 표면거칠기 향상과 디버링 효과 분석	72
4.3.1 실험의 구성	72
4.3.2 표면거칠기 향상 분석 결과	74
4.3.3 디버링 효과 분석 결과	82
4.4 회색관계 분석을 이용한 다목적 최적화	90
4.4.1 데이터 전처리 과정 및 편차 결과	90
4.4.2 회색관계 계수와 회색관계 등급 평가 및 분석	93
4.4.3 최적화 설계 검증 및 평가	96

5. 전자연마 가공의 적용 사례 연구	98
5.1 솔레노이드 밸브 부품 선정	98
5.2 실험 및 적용 결과	104
6. 결론	107
References	110



Nomenclature

B	: Magnetic flux density (T)
BR	: Coefficient of burr removal rate
$\vec{d}$	: Distance vector between poles of magnetized pin (m)
f_n	: Normal force per magnetic abrasive (N)
f_h	: Tangential force per magnetic abrasive (N)
F_n	: Normal force in magnetic abrasive finishing (N)
F_h	: Tangential force in magnetic abrasive finishing (N)
$\vec{F}_p$	: Magnetic force acting on magnetized pins (N)
$\vec{H}$	: Magnetic field (A/m)
I	: Inertia moment of magnetized pin ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
l	: Half length of magnetized pins (mm)
m	: Magnetic pole of magnetized pins
$\vec{m}_{eff}$	: Effective magnetic dipole moment ($\text{A}\cdot\text{m}^2$)
μ_{fm}	: Specific permeability of magnetic tool (H/m)
μ_0	: Permeability of free surface (H/m)
M	: Mass of magnetized pin (kg)
$\vec{M}$	: Magnetization (A/m)
n	: The number of abrasive particles in magnetic abrasive finishing
P_n	: Normal pressure per magnetic abrasives (Pa)
P_h	: Tangential pressure per magnetic abrasives (Pa)
$\vec{r}$	: Distance vector between magnetized pin and magnet (m)

ΔR_a	: Coefficient of surface roughness
S	: Contact area between magnetic tool and workpiece (m^2)
$\overline{T_p}$	: Magnetic torque acting on magnetized pins ($\text{N}\cdot\text{m}$)
v	: Velocity of magnetized pin (m/s)
V	: Volume of magnetized pin (m^3)
w	: Angular velocity of magnetized pin (rad/s)
W_m	: Magnetization energy (J)
W_f	: Repulsion energy (J)
W_t	: Tension energy (J)
x	: Target value
$x_0(k)$	: Desired value in grey relational analysis
$x_i^*(k)$	: Generating value in grey relational analysis
$x_i(k)$	: Experimental data
χ	: Susceptibility of magnetized pin
$\Delta_{0i}(k)$	: Deviation between target and normalized data
θ	: Angle of longitudinal axis of pin and rotational axis ($^\circ$)
ξ	: Distinguish coefficient
γ_i	: Grey relational grade
η	: Signal-to-noise ratio (dB)

List of tables

Table 3.1 Fixed process parameters	39
Table 3.2 Experimental factors and levels	39
Table 3.3 Boundary conditions for simulation	42
Table 3.4 Derived simulation results for magnetic flux density	45
Table 4.1 Specification of EMF equipment	61
Table 4.2 Chemical composition(wt. %) of Al6061	62
Table 4.3 Mechanical properties of workpiece	62
Table 4.4 Conditions of micro-milling operation	64
Table 4.5 Experimental conditions	68
Table 4.6 Experimental factors and levels	73
Table 4.7 Taguchi's $L_9(3^4)$ orthogonal array table	73
Table 4.8 Experimental results of calculated S/N ratio	78
Table 4.9 Experimental results of S/N ratio for each factor	80
Table 4.10 Results of best and optimal configuration	81
Table 4.11 Results of ANOVA for surface roughness	81
Table 4.12 Experimental results of calculated S/N ratio	85
Table 4.13 Experimental results of S/N ratio for each factor	87
Table 4.14 Results of best and optimal configuration	88
Table 4.15 Results of ANOVA for burr removal rate	89
Table 4.16 Results of grey relational generating and deviation sequence	92
Table 4.17 Grey relational coefficient and grade	95
Table 4.18 Mean response table for grey relational grade	97

Table 5.1 Results of external part in optimal condition	106
Table 5.2 Results of internal part in optimal condition	106



List of figures

Fig. 1.1 Derived major characteristics under surface integrity	3
Fig. 1.2 Schematic category of post-finishing processes	4
Fig. 1.3 Comparison to conventional finishing and MAF process	5
Fig. 1.4 Schematic diagram of purpose on present study	11
Fig. 2.1 Basic principal of MAF process	14
Fig. 2.2 Force acting on abrasive particles against workpiece	15
Fig. 2.3 Drawbacks in MAF process for non-ferrous material	18
Fig. 2.4 Magnetic flux density for non-ferrous and ferros material	18
Fig. 2.5 Burr removal mechanism in tool rotational direction	19
Fig. 2.6 Schematic apparatus of EMF process	22
Fig. 2.7 Derived magnetic force and torque in magnetic field	26
Fig. 2.8 Magnetization curves for SUS304	27
Fig. 2.9 Mechanism of pins' behavior in magnetic field	27
Fig. 2.10 Procedure of grey relational analysis	30
Fig. 2.11 Multi-objective optimization without GRA	33
Fig. 2.12 Grey relational generating for multiple characteristics	33
Fig. 2.13 Process of grey relational coefficient	36
Fig. 2.14 Process of grey relational grade	36
Fig. 3.1 Schematic diagram of an EMF apparatus	38
Fig. 3.2 3D modeling of EMF device	41
Fig. 3.3 Mesh modeling of the EMF device	42
Fig. 3.4 Averaged magnetic flux density of magnet shape	48
Fig. 3.5 Averaged magnetic flux density of radial distance	48

Fig. 3.6 Magnetic flux density distribution of working gap	49
Fig. 3.7 Magnetic flux density for 3 pieces of magnets	50
Fig. 3.8 Magnetic flux density for 4 pieces of magnets	51
Fig. 3.9 Magnetic flux density for 5 pieces of magnets	52
Fig. 3.10 Magnetic flux density distribution at NNNN	55
Fig. 3.11 Magnetic flux density distribution at NNSS	56
Fig. 3.12 Magnetic flux density distribution at NSNS	57
Fig. 3.13 Comparison to magnetic flux density distribution of conducted configuration	58
Fig. 3.14 Comparison to magnetic flux density distribution of actual and simulated arrangement	58
Fig. 4.1 Conducted workpiece and burr formation	63
Fig. 4.2 Measuring method and definition of burr height	63
Fig. 4.3 Averaged burr height formed by milling operation	66
Fig. 4.4 Change in surface roughness at 1kg	71
Fig. 4.5 Change in surface roughness at 2kg	71
Fig. 4.6 Improved surface roughness ratio(ΔR_a) and S/N ratio	79
Fig. 4.7 Main effect of process factors on surface roughness	80
Fig. 4.8 Burr removal rate(ΔBR) and S/N ratio	86
Fig. 4.9 Main effect of process factors on burr removal rate	87
Fig. 4.10 Burr removal area in optimal condition	88
Fig. 4.11 Main effect of process factors on multiple requirements	97
Fig. 5.1 Operating principle of auto transmission	101
Fig. 5.2 Schematic structure of solenoid valve	102

Fig. 5.3 Components of solenoid valve	103
Fig. 5.4 Conducted holder of solenoid valve	105



List of photographs

Photo 4.1 Experimental machine of EMF process	61
Photo 4.2 Measuring equipment	65
Photo 4.3 Actual arrangement of workpiece with magnetized pins	68



A study on machining characteristics and optimization for aluminum material by electro-magnetic finishing

Chul Bae Son

Department of Mechanical Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The final status of workpiece surface decides product quality, manufacturing cost and improvement of functionality. Thus, numerous traditional finishing methods such as super-finishing, honing, grinding are widely employed for fine surface. However, these conventional techniques with rigid tools have limitation of complex shape of surface and productive efficiency. Since demands for better surface characteristics for free-form shape with less time and cost, it is necessary to develop advanced finishing ones which are required to achieve better surface integrity.

Among the novel processes, magnetic finishing processes in the presence of the magnetic field have been especially attracted in the last decades. This is because it could acquire high geometric precision by adjusting magnetic force acting on free-form surface with the flexible tool. Although these processes have a number of benefits, it has also limitation of time consuming and process efficiency for non-ferrous materials due to lack of magnetic permeability. Some of research has attempted to increase magnetic intensity by applying permanent magnets for non-ferrous materials but distribution of magnetic flux density directly related to magnetic force is not symmetrical unlike ferrous materials.

Consequently, this phenomenon leads to getting non-uniform surface and removing edge of the workpiece excessively.

In order to overcome drawbacks of magnetic abrasive finishing, this study suggests a electro-magnetic finishing(EMF) process which combined magnetic energy derived form rotating disc with permanent magnets and kinetic energy acting on magnetic pins as polishing medium in the alternating magnetic field. To optimize magnitude and distribution of magnetic flux density in EMF process, finite element analysis is carried out by using Ansys workbench. In addition, experiments is carried out applying a Taguchi's $L_9(3^4)$ orthogonal method based on computational simulation to verify effects of EMF process on improving surface roughness and burr removal rate. According to the results, grey relational analysis(GRA) is conducted to find out an optimal condition satisfying both requirements simultaneously.

Moreover, it is proved that suggested EMF method in this study is valuable for manufacturing industries based on experimental results applied to the holder of solenoid valve.



1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

공작물의 표면 정밀도는 Fig. 1.1과 같이 제품의 품질에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라 제품의 신뢰도 및 생산성을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 산업계에서 요구하는 고품질, 고정도 등의 다양한 조건을 충족하기 위하여 Fig. 1.2와 같이 다양한 마무리 가공 공정이 적용되고 있다^[1-8].

공구가 고정되어 있는 호닝, 슈퍼피니싱, 그라인딩과 같은 가공 방법이 경제성 및 편의성을 바탕으로 지금까지 산업계 전반에 걸쳐 사용되어지고 있다. 하지만 이러한 방법들은 제품의 형태, 직경, 공구의 유연성 등에 제약이 따른다^[9-12]. 최근 반도체, 우주항공, 디스플레이 산업의 발달로 세라믹, 비철 금속, 스테인리스 강과 같은 난삭재들이 각종 기계 부품으로 사용되고 있고, 집적화된 초소형 제품의 수요가 급증함에 따라 새로운 가공 기술 개발이 요구되어지고 있다^[13-17]. 위와 같은 기존의 후처리 공정이 가지는 한계점을 해결하고 공정 효율 및 표면 정밀도를 향상시키기 위하여 기존 가공 공정을 바탕으로 응용된 ELID(Electrolytic in process dressing), EDG(Electric discharge grinding), ECH(Electrochemical honing) 등과 같은 복합 공정이 개발되었지만, 여전히 기존 가공 공정이 가지는 근본적인 문제점을 해결하지 못하고 있다^[18-19]. 따라서 복잡한 형상을 가지는 제품의 표면 품질을 향상시킬 수 있는 새로운 공정 개발이 요구되어진다.

입자유동 가공, 자기연마 가공, 기계-화학 가공 등과 같이 공구의

유연성이 확보되는 마무리 가공 공정 중 자기장의 세기와 분포에 영향을 받는 자기연마 가공(Magnetic abrasive finishing, MAF)은 자유곡면을 가지는 복잡한 형상이나 파이프 내·외면의 버 제거와 표면거칠기 향상에 효율적임이 입증되었다^[20-31]. Fig. 1.3은 고정된 공구를 사용하는 기존 연마 공정과 MAF 가공을 비교하여 나타낸 것이다. MAF 가공의 연마공구는 자기력선에 따라 배열이 재 정렬되기 때문에 공구의 형상이 소재의 형상에 따라 자유롭게 변화한다. 따라서 자유곡면을 가지는 제품의 표면 품위 향상 및 형상 오차 감소에 대한 이점을 가지고 있다^[32-37]. 하지만 자기력의 분포가 균일하지 않은 대면적 곡면과 낮은 자화율을 가지는 비자성체에 대한 가공 효율이 현저히 낮다. 일부 연구에서는 비자성체에 대한 MAF 가공 효율을 향상시키기 위하여 영구자석 또는 전자석을 이용하여 자속밀도를 증대시켰지만 인위적인 자석 배열로 인해 자성체와는 달리 자속밀도의 분포에 편차가 발생하였다^[38-42]. 이러한 분포 현상은 과도한 버 제거로 인한 형상 오차 및 불균일한 표면을 유발한다.

본 연구에서는 MAF 가공이 가지는 이점을 활용하고 공정의 문제점을 해결하고자 전자연마(Electro-magnetic finishing, EMF) 가공을 제안하고자 한다. EMF는 비교적 최근에 개발되어 학술적으로 분석된 사례는 거의 없다. 따라서 본 논문에서는 EMF의 자기장 분포와 연마粉的 운동 특성을 분석하고 U채널 형상을 가지는 Al6061의 표면거칠기 향상과 디버링 효과를 연구하고자 한다. 나아가 산업계에서 활용이 가능함을 입증하기 위하여 대상부품을 선정하고 적용한 결과를 분석하여 EMF 가공의 우수성을 확인하였다.

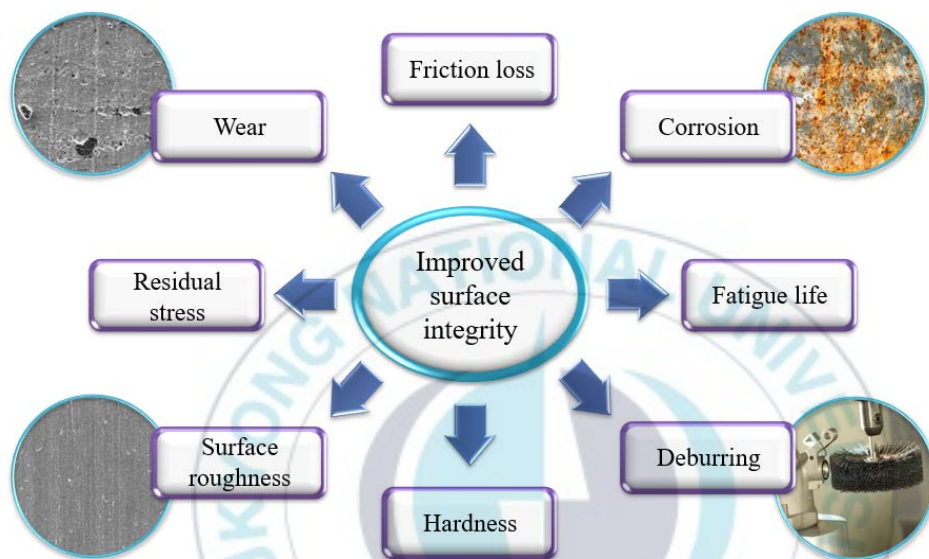


Fig. 1.1 Derived major characteristics under surface integrity

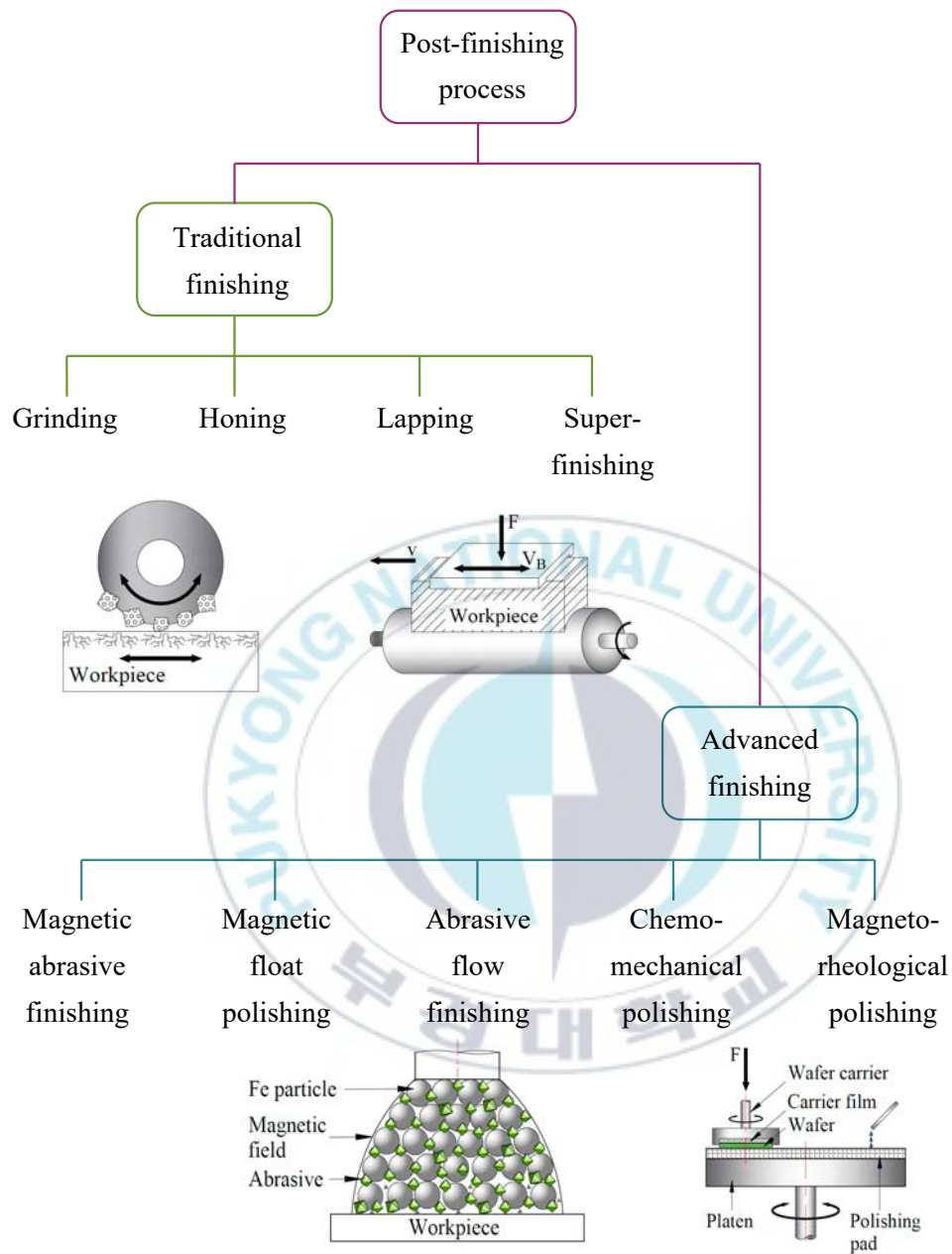
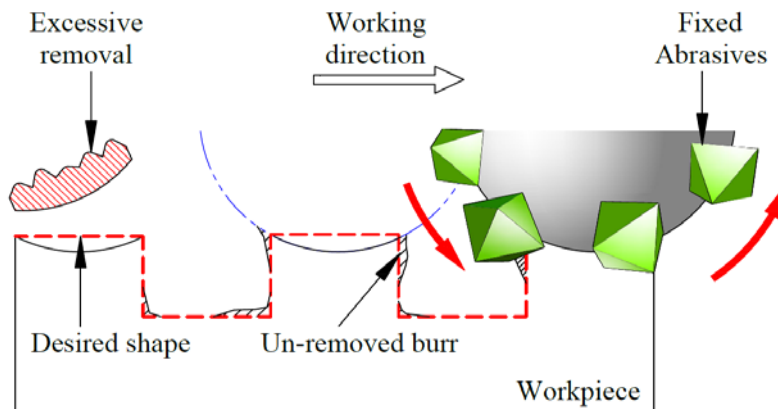
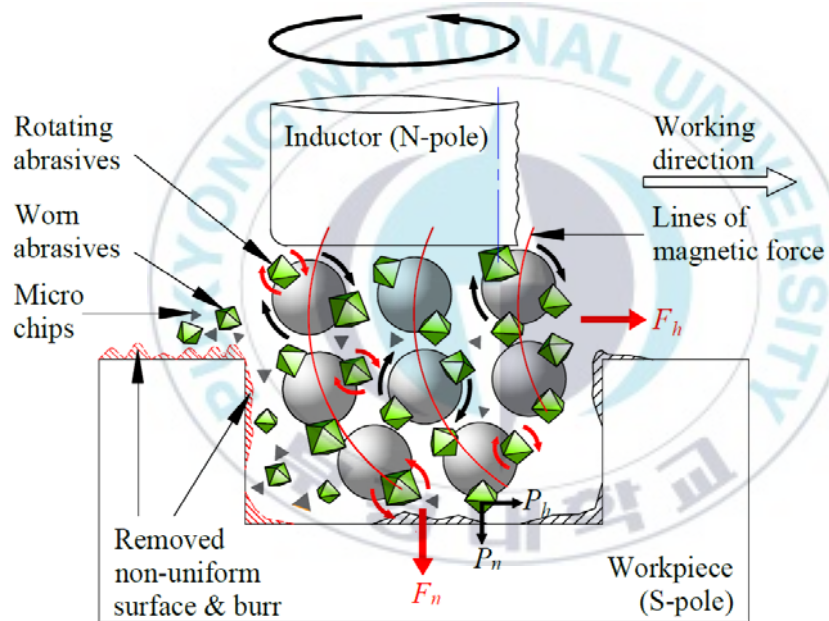


Fig. 1.2 Schematic category of post-finishing processes



(a) Conventional finishing process



(b) MAF process

Fig. 1.3 Comparison to conventional finishing and MAF process

1.2 국내외 연구동향

제품의 소형화 및 정밀화 추세에 따라 표면 품위 향상에 관한 새로운 마무리 공정에 관한 연구들이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그 중 자기에너지를 활용하는 MAF 가공은 연마공구의 유연성으로 표면에 작용하는 연마 힘을 쉽게 조절할 수 있고 가공 시 표면 결함을 최소화할 수 있다. 이 때문에 MAF 가공에 관한 기본연구와 이를 응용하여 산업계에 적용하기 위한 응용연구들이 수행되고 있다.

Fox^[43] 등은 비자성체인 원통형 시편에 혼합형 연마공구와 일체형 연마공구를 이용하여 표면거칠기 및 디버링 향상 효과를 평가하여 각각의 효과를 입증하였다. Jain^[44] 등은 실험을 통해 공구와 공작물 사이 간극과 연마공구의 회전 속도의 변화가 표면가공에 미치는 영향에 대해 평가하였다. Singh^[45-46] 등은 공정인자의 영향력을 분석하고 자속 밀도와 공구와 공작물 사이의 거리가 가공효율의 향상에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 인덕터에 공급되는 전류의 세기와 비례하여 자기에너지 증가하고 이는 가공성능과 비례함을 실험을 통해 입증하였다.

MAF 가공은 자기에너지를 이용하여 표면을 가공하므로 자기력의 세기가 가공성능을 결정한다. 자성체는 투자율이 높아 연마공구만으로 요구되는 표면정도를 만족할 수 있지만 비자성체의 경우 가공효율을 향상시키기 위해 별도의 장치가 필요한 것으로 알려져 있다. Yamaguchi 와 Shinmura^[47]는 비자성체 파이프 내부의 표면정도 향상을 위하여 외부에 4개의 자석을 설치하고 회전 속도와 극성을 변화시켜 표면거칠기 향상 정도를 측정하였다. Kim 과 Kwak^[48]은 자기력의 세

기와 극성을 변화시킬 수 있는 장치를 개발하여 비자성체에 대한 MAF 가공의 연마효율을 증대시켰다. 또한 Kim^[49] 등은 공구와 비자성 공작물 사이에 발생하는 자속밀도의 세기를 극대화할 수 있는 공구 형상을 설계하고 이를 시뮬레이션과 실험계획법에 따른 실험을 통해 입증하였다.

Jin^[50] 등은 전자석에 공급되는 전류를 간헐적으로 공급함으로써 표면거칠기 향상시켰고, Park^[51] 등은 진동테이블을 이용하여 연마 공정을 수행함으로써 가공성을 향상시켰다. Mulik과 Panadey^[52-53]는 MAF 가공과 초음파 진동을 결합한 복합연마 공정을 제시하고 실험을 수행한 결과, 연마입자의 접선방향 힘을 증가로 인해 표면가공 효율을 향상됨을 확인할 수 있었다. Park^[54-55] 등은 효율적인 디버링 공정을 위해 진동테이블을 설계하고 개발한 공구에 적합한 공정 조건을 찾기 위한 실험을 수행하였다.

그러나 지금까지 수행된 MAF 가공은 다수의 관재나 파이프의 내외부 연마에 치중되어 있기 때문에 실제 자유곡면을 가지는 난삭재에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 또한 투자율이 낮은 비자성체와 대량 가공에 대한 가공 효율이 현저히 떨어지는 것으로 알려져 있다.

이러한 MAF 가공의 단점을 보완하기 위하여 자기에너지를 이용한 복합연마 공정에 관한 연구가 일부 이루어지고 있지만 평면가공이나 파이프 내외부 연마에 대한 비중이 높다^[56-57]. 따라서 본 연구에서는 MAF 가공의 단점을 극복하고 자유곡면을 가지는 난삭재에 대한 표면정도의 향상을 위하여 자기에너지와 연마 핀의 운동에너지를 활용한 EMF 가공을 제안하고 그 특성을 분석하고자 한다.

1.3 연구 목적 및 내용

본 연구에서는 MAF 가공에서 비자성체 가공에 대한 비효율적인 문제점을 해결하고 소재의 표면 품위 향상 및 형상 오차를 최소화하기 위하여 자기에너지와 운동에너지를 활용한 EMF 가공을 제안하였고 SUS304 소재인 연마 핀을 활용하여 디버링 및 표면거칠기 향상 정도를 평가하고자 한다.

EMF 가공에서 연마 핀의 유동은 영구자석이 부착된 자기 원판 디스크의 회전으로 발생된 자기에너지의 영향을 받는다. 변화하는 자기에너지가 자화된 핀에 작용하면 원형 디스크의 원주 방향으로 핀이 공전하거나 서로 다른 극을 가지는 핀의 양 끝단에 의해 우력 모멘트가 발생하여 자전함으로써 소재의 표면을 타격할 수 있는 운동에너지로 변환된다.

본 연구에서 제안하는 EMF 가공의 매커니즘 분석을 바탕으로 자기력의 세기와 분포는 가공 성능을 결정하는 중요한 요소임을 확인하였다. 주요인자에 따른 자기력의 변화를 예측하기 위하여 Ansys workbench를 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 주요인자는 영구 자석의 형태, 개수, 위치 반경, 자기 원판 디스크와 원형 수조의 거리이며 실험계획법을 통해 시뮬레이션을 수행하여 각 인자의 특성을 파악하였다. 시뮬레이션을 통해 분석된 최적의 자기장 조건을 기준으로 실험장치를 구성하였고 자유곡면을 가지는 비자성 소재에 대한 가공 효율을 평가하였다.

EMF 가공에서 자기력의 세기 및 분포 이외 연마 핀의 직경, 연마

핀의 무게, 가공 시간, 자기 원판 디스크의 회전 속도 등의 공정변수 조합 또한 가공 효율에 중요한 요소로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 위와 같이 언급된 공정 변수를 주요인자로 선정하여 U채널 형상을 가지는 Al6061에 대하여 표면거칠기 향상과 버 제거 효율에 영향을 미치는 인자의 영향력과 특성을 다구찌 직교배열법을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과를 토대로 소재의 균일한 표면과 형상의 정확성을 모두 만족할 수 있는 공정 조건을 도출하기 위하여 회색관계 분석법(Grey relational analysis, GRA)을 이용하였고, 이를 통해 전자연마 공정에 대해 목적에 맞는 최적의 공정 조건을 찾을 수 있었다.

또한 본 연구에서 제안한 전자연마 공정의 효용성을 입증하기 위하여 자동변속기의 핵심 부품인 슬레노이드 밸브 홀더의 표면을 최적 공정 조건에 따라 가공하였다. 실험 결과, 표면거칠기와 버 제거정도가 향상됨을 확인할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 최근 널리 사용되는 비자성체에 대한 MAF 가공법의 문제점을 개선하고 대면적 표면가공에 적용함으로써 소재의 마무리 가공 공정 발전에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

1.4 연구 논문의 구성

본 연구에서는 EMF 가공 공정을 제시하고 시뮬레이션 해석 및 실험적 방법을 이용하여 비자성체에 대한 공정의 효율성을 평가하였다. Fig. 1.4는 연구 구성에 대해 도식적으로 나타낸 것이다.

본 논문의 1장은 연구의 배경, 목적 및 동향을 나타내었고 2장은 MAF 가공 기본 메커니즘과 한계점, EMF 가공 정의와 공정 메커니즘, 최적화 도출에 필요한 GRA에 대한 이론적 배경을 설명하였다. 3장에서는 Ansys workbench를 활용하여 EMF 가공의 공정변수에 따른 자기력의 세기 및 자기 밀도의 분포 정도를 해석하였고, 4장에서는 실험을 통해 디버링 효율과 표면의 평탄도를 평가하였고 GRA를 이용하여 다목적 함수를 모두 충족하는 최적 조건을 도출하였다. 5장에서는 비자성체 소재에 대해 효과가 입증된 EMF 가공을 이용하여 자동차 솔레노이드 밸브 부품 중 하나인 스펴에 대해 최적 조건을 기준으로 실험을 수행하여 자유 형상에 대한 공정의 효과를 분석하였다. 마지막으로 6장은 본 연구의 결론을 나타내었다.

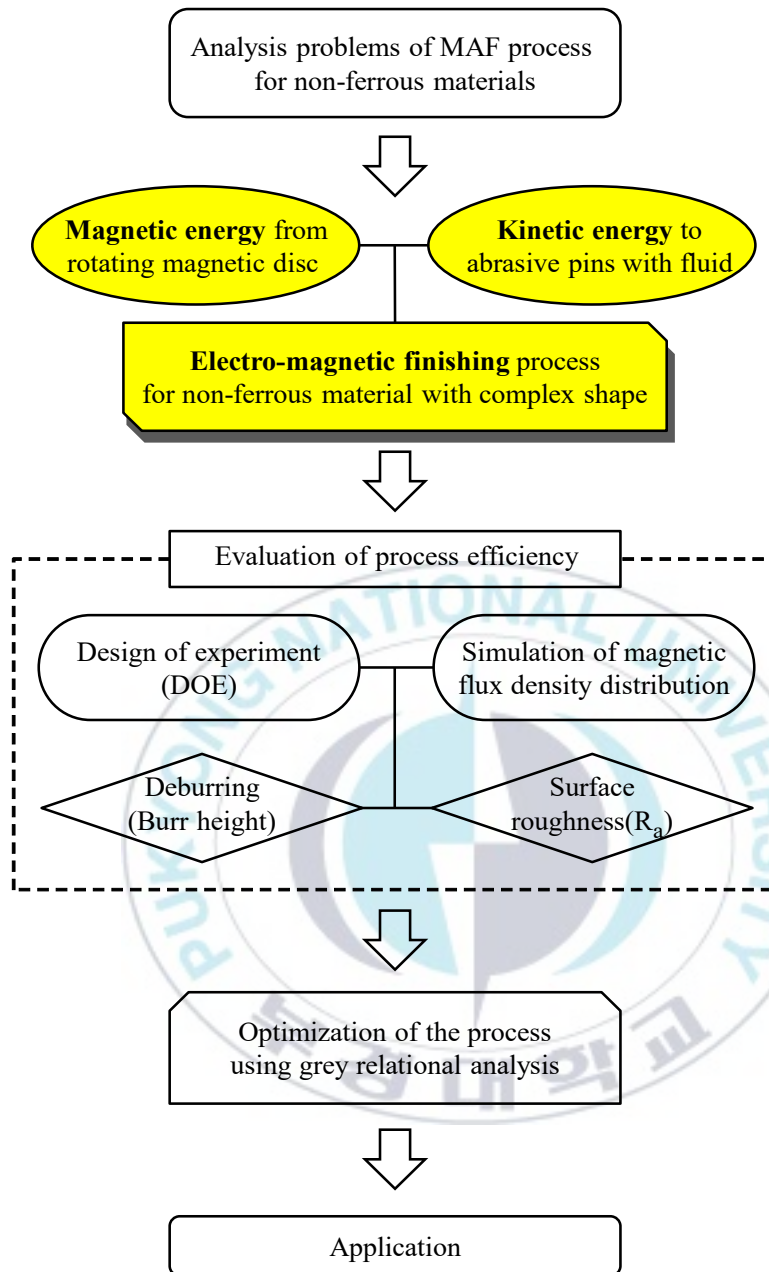


Fig. 1.4 Schematic diagram of purpose on present study

2. 이론적 배경

2.1 자기연마 가공

2.1.1 자기연마 가공의 원리

MAF의 기본적인 공정 원리는 Fig. 2.1과 같다. 코일이 감긴 전자석에 전류를 인가하면 페러데이 법칙에 의해 자기장이 발생된다. 공작물 가공을 위하여 연마입자와 자성입자를 일정 비율로 혼합하여 공구와 공작물 사이에 공급하면 발생된 자기장에 의해 자성입자가 사슬구조로 정렬되고 연마입자는 자성입자들 사이에 구속된다. 자기력의 세기, 공구의 회전속도, 입자의 혼합비율에 따라 자기연마공구의 형상이 변화 가능하여 소재의 형상에 제약을 받지 않고 연마공정을 수행할 수 있다^[58-67].

MAF 가공에서 연마입자에 작용하는 힘은 Fig. 2.2와 같다. 하나의 자기연마입자에 작용하는 힘은 자기력에 의한 법선방향의 힘, f_n ,과 공구의 이송 및 회전에 의한 접선방향의 힘, f_h ,이며 합력 f 에 의해 연마 가공이 이루어진다. 각각의 힘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_n = nP_n, \quad f_h = nP_h \quad (2.1)$$

여기서 n 은 가공 공정 중 공작물에 접촉하는 총 연마입자의 개수를

나타낸다. P_n 과 P_h 는 각각 하나의 연마입자에 작용하는 법선방향의 힘과 접선방향의 힘을 의미한다.

식 (2.1)을 바탕으로 전체 자성연마입자에 작용하는 법선방향의 총 힘, F_n ,은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_n = nf_n = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_{fm}}\right) S \quad (2.2)$$

여기서 B 는 자속밀도, μ_0 는 공기 중에서의 투자율, μ_{fm} 는 공작물의 비투자율, S 는 공작물이 접촉하는 면적이다.

전체 접선방향의 힘, F_h ,는 공구 반경 방향의 거리 변화에 따른 에너지 변화량을 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_h = \frac{dW}{dx} = \frac{d(W_m + W_f + W_t)}{dx} \quad (2.3)$$

여기서 x 는 공구 중심에서 반경 방향의 거리를 의미하고 W 는 공구와 공작물 사이에 정렬된 자성연마입자에 작용하는 에너지이다. 전체 W 는 자력에 의한 에너지 W_m , 자화된 자성연마입자의 척력에 의한 반발에너지 W_f , 공구 회전 시 공구의 끝단 부분에서 발생하는 인장에너지 W_t 로 구분된다.

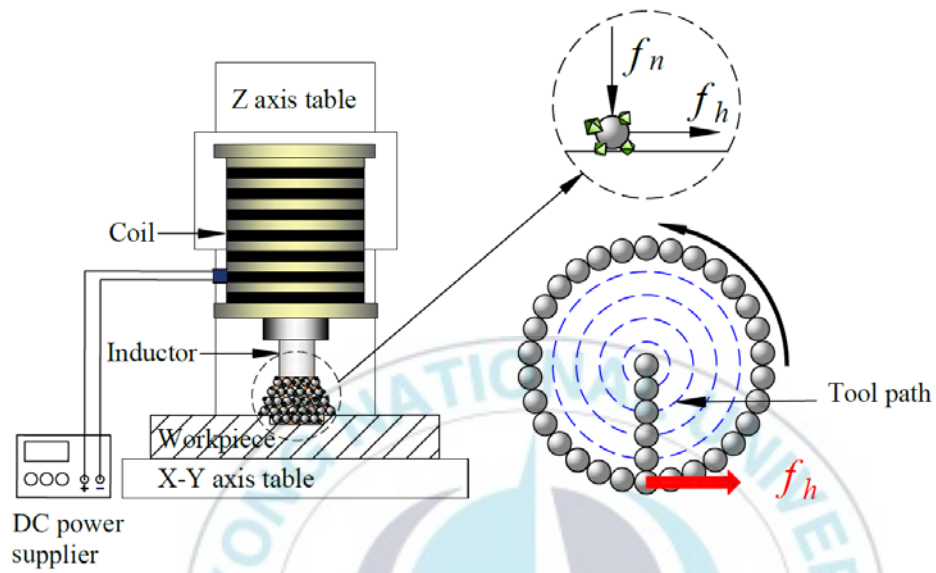


Fig. 2.1 Basic principle of MAF process

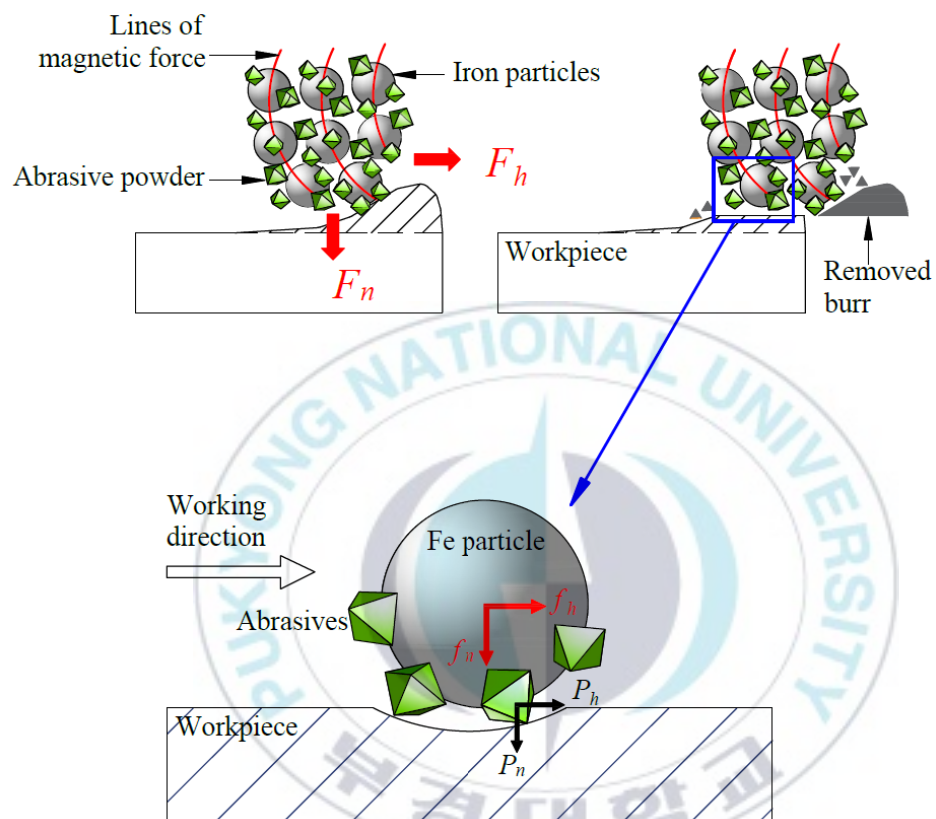


Fig. 2.2 Force acting on abrasive particles against workpiece

2.1.2 자기연마 가공의 한계점

표면거칠기 향상 및 디버링 효과의 증대를 위하여 적용되는 MAF 가공은 자기력의 세기에 따라 가공 효율이 달라진다. 비자성체 소재의 경우 투자율이 낮아 공구와 공작물 사이에 자기력의 세기가 약하거나 자기장이 형성되지 않기 때문에 MAF 가공으로 소재 표면의 평탄도 향상이나 버 제거 효과를 기대할 수 없다.

MAF 가공에서 비자성 소재에 대한 공정 효율을 증대시키기 위하여 Fig. 2.3과 같이 소재의 아래 부분에 영구자석 혹은 전자석을 설치하여 자기장의 세기를 조절한다. Fig. 2.4는 비자성체 표면에서 발생하는 자속밀도의 직경 및 형성 특징을 비교하기 위하여 자기연마 공구의 영향을 받는 공구 중심 부분에서 4mm 간격으로 자기력을 측정하는 것이다. 자기력 측정 시, 인덕터에 부과되는 기준 전류 값은 4.5A이며 공구와 공작물의 간격은 1mm이다. 측정 결과는 측정 환경에 따른 오차와 자기력 특성을 감안하여 곡선 형태로 나타내었다. Fig. 2.4를 통해 알 수 있듯이 영구자석이 설치되어 있지 않을 때 표면에서의 자속밀도는 미미하게 발생됨을 알 수 있었다. 또한 영구자석의 거리에 따른 자속밀도가 일정하지 않기 때문에 영구자석 설치 후에도 공구 반경에 따른 자기장 세기의 변화가 일정하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 자성체의 자기장 세기 변화가 측정된 영역에서 대칭 형태로 나타나는 것과 대비됨을 알 수 있었다. 이러한 이유로 비자성체에 MAF 가공을 적용할 경우, 자기연마 공구는 자속밀도가 비교적 큰 영역에만 분포하거나 원심력에 의해 일부 자기연마입자가 공구 외곽 부분에만 존재함으로써 일부 구간에서 Fig. 2.3과 같이 연마되지 않는 부분

이 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

또한 공구의 회전방향과 형상에 따라 소재의 일부분이 과도하게 제거됨으로써 형상 오차가 발생됨을 알 수 있다. 이는 MAF 가공이 자기력선을 이용하여 자기연마입자 공구를 회전시키기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 2.5는 MAF 가공을 이용하여 U형상 채널을 가공할 경우 공구의 회전방향에 따른 연마특징을 나타낸 것이다. Fig. 2.5(a)와 같이 자기연마입자가 아래 방향으로 향할 경우 자기연마입자 공구에 작용하는 접선 방향의 힘에 의해 버를 제거할 수 있음을 확인할 수 있었다. 반면에 Fig. 2.5(b)와 같이 연마입자가 U채널에서 소재의 상부로 향할 경우 가공된 형상의 급격한 경사로 인해 연마입자와 자성입자가 자기력선에서 이탈하는 현상이 발생되었다. 기존의 평면에서는 공구의 이탈 시 근접한 자기력선에 의해 입자가 재배열되지만 유로가 형성된 채널의 경우 형상의 특징으로 인해 입자가 재배열하지 못하고 이탈하여 바닥에 퇴적층을 형성함으로써 버 제거에 관여하는 자기연마입자의 양이 줄어들어 버 제거에 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

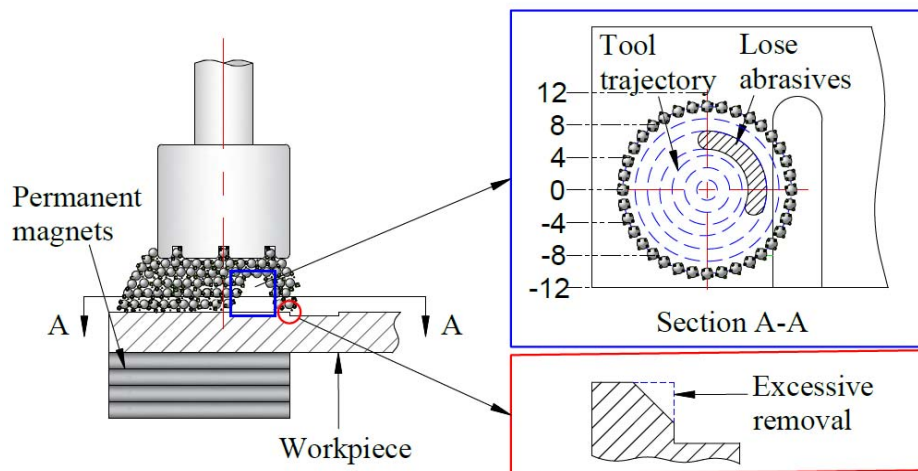


Fig. 2.3 Drawbacks in MAF process for non-ferrous material

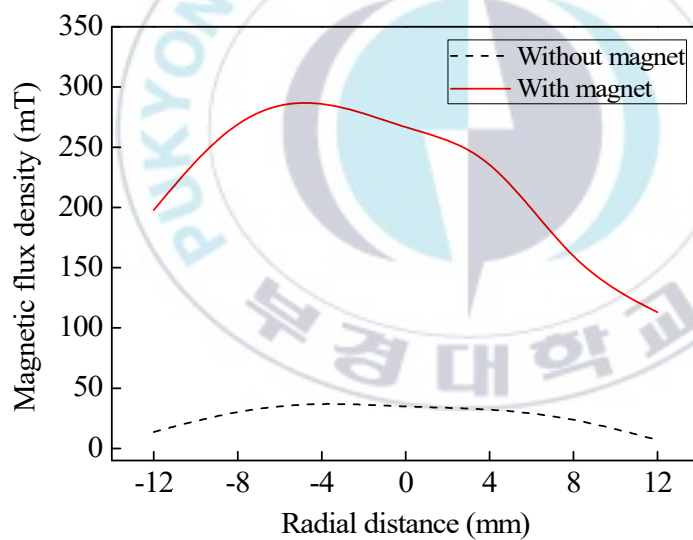
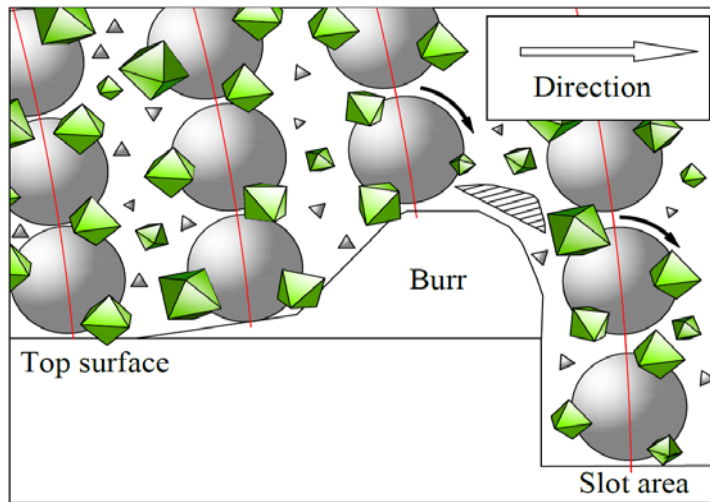
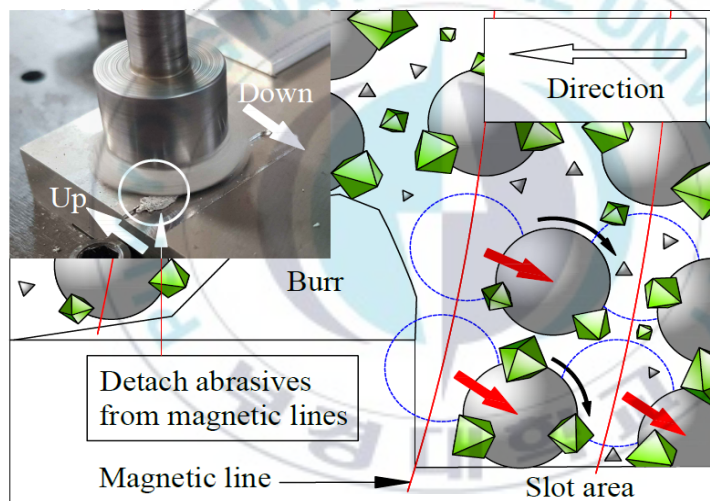


Fig. 2.4 Magnetic flux density for non-ferrous and ferros material



(a) Downward direction



(b) Upward direction

Fig. 2.5 Burr removal mechanism in tool rotational direction

2.2 전자연마 가공

2.2.1 전자연마 가공의 구성 및 개념

MAF 가공 성능은 자기력의 세기에 직접적인 영향을 받기 때문에 투자율이 낮은 비자성체에 대한 가공 성능은 자성체 대비 현저히 낮게 나타난다. 또한 가공 대상이 평면일 때 전체 영역을 가공하기에는 적합하지만 국소적인 영역의 단차나 경사가 있는 경우 형상 오차나 불균일한 표면이 발생하여 정밀한 마무리 가공하기 어렵다는 단점이 있다. 그렇기 때문에 형상이 복잡할수록 가공시간이 오래 소요되기 때문에 대량생산에 비효율적이다.

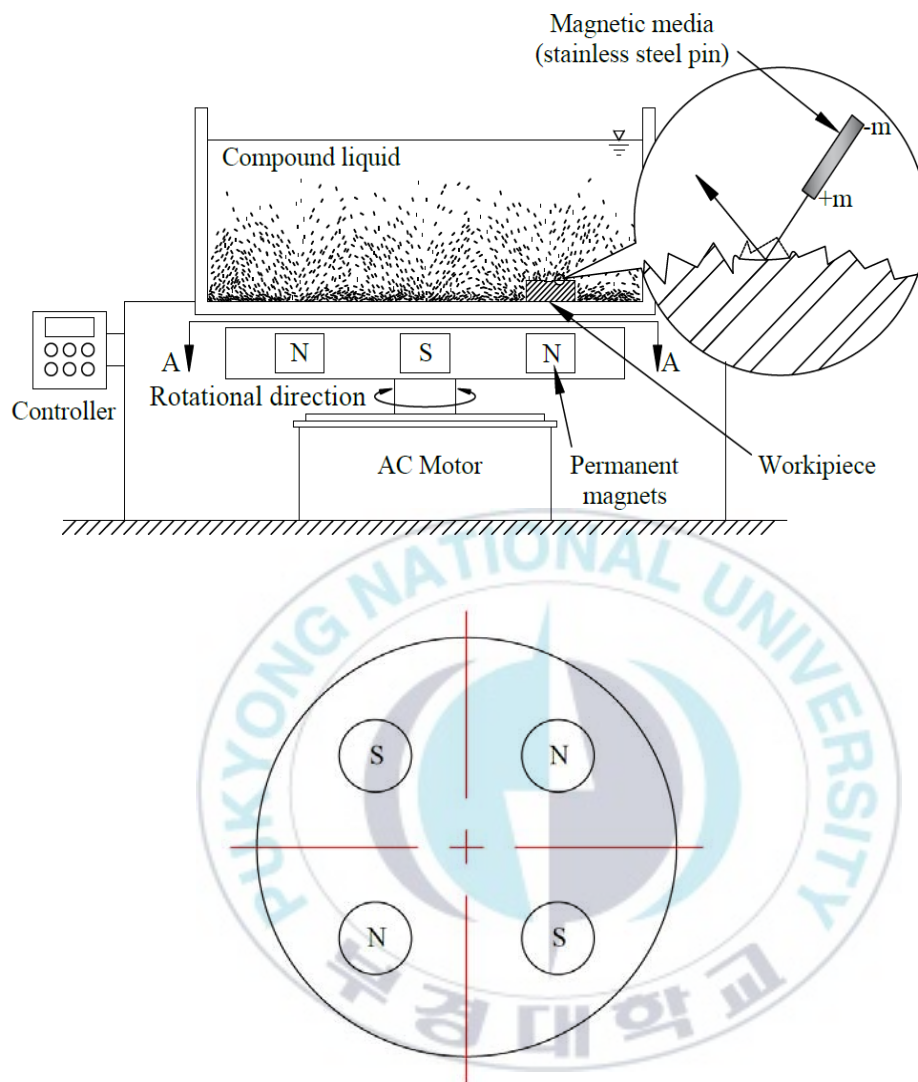
이러한 문제점을 해결하기 위하여 자유곡면에 대한 새로운 연마방법 적용이 요구되어진다. 따라서 본 연구에서는 비자성체인 Al6061의 표면거칠기와 디버링 효율 향상을 위하여 전자연마 공정을 제안하고 가공 효율에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

EMF 가공은 자성에너지를 이용한 MAF 가공과 연마 핀의 운동에너지를 이용한 새로운 복합 마무리 공정으로 소재 표면의 광택도, 평탄도, 잔류응력을 향상시키는 연마법이다. 개략적인 장치의 구성은 Fig. 2.6과 같으며 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 공작물의 연마에 직접적인 영향을 주는 연마 핀과 연마 핀의 원활한 유동을 위하여 연마액이 혼합된 물을 담을 수 있는 원형 수조가 있고, 수조 하부에 자기력을 형성시키는 영구자석이 설치된 자기 원판 디스크가 있다. 또한 연마 핀의 운동에너지 형성에 필요한 자기장 변화를 위하여 자기 원판 디스크를 회전시킬 수 있는 AC모터로 구성되어 있다. 연마 핀

의 재질은 발생된 자기장에 의해 유동이 가능한 SUS304이다.

AC모터에 전류가 인가되면 원판 디스크는 기계적인 연결에 의해 회전하게 되고 자기 원판 디스크에 부착된 영구자석 또한 회전하면서 원형 수조 내에 자기장이 변화하게 된다. 원형 수조 내 자기장이 변화하면 연마 핀은 자화되어 핀의 양 끝단에 서로 다른 극성 $+m$ 과 $-m$ 이 발생된다. 극성이 생긴 연마 핀들은 자기 원판 디스크가 회전하면서 발생된 자기장 내에서 힘과 우력 모멘트에 의해 공전과 자전을 반복하고 공작물 표면을 타격함으로써 표면거칠기와 버 제거 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.





Section A-A

Fig. 2.6 Schematic apparatus of the EMF process

2.2.2 전자연마 가공 메커니즘

EMF 가공 공정에서 원형 수조 내에 형성된 자기장 $\bar{H}(\bar{r})$ 에 의해 SUS304 소재인 연마 핀에는 Fig. 2.7(a)와 같이 힘 $\bar{F}_p$ 이 작용하고 이 힘은 연마 핀이 원형 수조의 원주 방향으로 운동할 수 있도록 공전운동을 일으킨다^[68-69]. 연마 핀에 작용하는 힘은 아래 식 (2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{F}_p = m\bar{H}(\bar{r} + \bar{d}) - m\bar{H}(\bar{r}) \quad (2.4)$$

여기서 $\bar{d}$ 는 양극 $+m$ 과 $-m$ 사이의 거리 벡터를 의미하고 $\bar{r}$ 은 연마 핀과 영구자석의 거리 벡터를 나타낸다.

만약, $\bar{d}$ 가 $\bar{r}$ 에 비해 상대적으로 작은 값을 가지면 식 (2.4)는 테일러 급수 전개를 이용하여 아래와 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{F}_p &= m\{\bar{H}(\bar{r}) + \bar{d} \cdot \nabla \bar{H}(\bar{r})\} - m\bar{H}(\bar{r}) \\ &= m\bar{d} \cdot \nabla \bar{H} = m_{eff} \cdot \nabla \bar{H} \end{aligned} \quad (2.5)$$

여기서 m_{eff} 는 입자의 극에 작용하는 자기모멘트를 의미한다.

자기 원판 디스크의 영구자석으로 인해 발생된 자기장에 의해 SUS304 핀은 자화되고 자기장의 세기에 따라 자화정도가 변화하게

된다. Fig. 2.8은 자화곡선으로 도식화 한 것으로 자화정도는 자기장의 세와 선형적인 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 측정된 자기장의 세기는 약 70mT로 자화의 세기가 포화상태에 비해 현저히 낮으므로 자화세기 $\overline{M}$ 과 자기장 $\overline{H}$ 의 관계를 식 (2.6)과 같이 표현할 수 있다^[69-70].

$$\overline{M} = \chi \overline{H} \quad (2.6)$$

여기서 χ 는 연마 핀의 투자율을 나타내고 식 (2.5)와 (2.6)을 바탕으로 $\overline{F}_p$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{F}_p = m_{eff} \cdot \nabla \overline{H} = V \overline{M} \cdot \nabla \overline{H} = \chi V \overline{H} \cdot \nabla \overline{H} \quad (2.7)$$

연마 핀에는 Fig. 2.7(b)와 같이 우력 모멘트 $\overline{T}_p$ 도 작용하고 이로 인해 연마 핀은 자전운동 함으로써 표면가공 향상에 영향을 미치게 된다. 우력 모멘트는 식 (2.8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{T}_p &= \frac{\overline{d}}{2} \times m \overline{H} - \frac{\overline{d}}{2} \times (-m \overline{H}) \\ &= m \overline{d} \times \nabla \overline{H} = \chi V \overline{H} \times \nabla \overline{H} \end{aligned} \quad (2.8)$$

자기에너지에 의해 발생된 공전운동과 자전운동으로 연마 핀은 병진 운동에너지와 회전 운동에너지를 가지게 된다. 따라서 핀이 가지는 총 운동에너지 K 는 병진 운동에너지와 회전 운동에너지의 합으로 식 (2.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{1}{2}(Mv^2 + Iw^2) \quad (2.9)$$

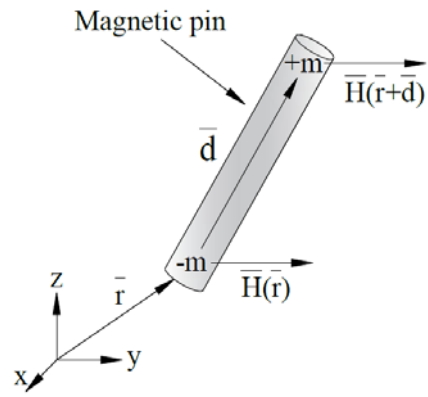
여기서 M 은 입자의 질량, v 는 연마 핀의 공전속도를 나타낸다. I 는 관성모멘트 w 는 각속도를 의미한다.

관성모멘트 I 는 연마 핀의 형상에 따라 다르며, 본 연구에서는 원통 형상의 연마 핀을 사용하므로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

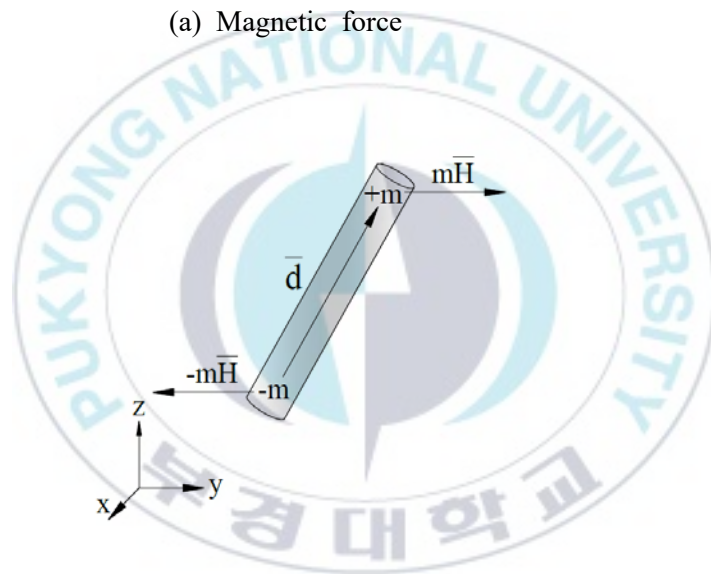
$$I = \frac{1}{3}Ml^2 \sin^2 \theta \quad (2.10)$$

여기서 l 은 연마 핀의 절반 길이, θ 는 연마 핀의 길이 축과 회전 축 사이의 각도를 나타낸다.

자기력을 직접적으로 활용하는 MAF 가공에 비해 EMF 가공은 Fig. 2.9와 같이 자기력을 활용하여 연마입자에 운동에너지를 발생시켜 소재의 표면 상태를 개선하는 마무리 공정이다. 따라서 공작물의 소재와 형상에 제약이 없기 때문에 대량으로 가공할 수 있고 MAF 가공 대비 가공 효율의 향상이 가능할 것으로 기대된다.



(a) Magnetic force



(b) Magnetic torque

Fig. 2.7 Derived magnetic force and torque in magnetic field

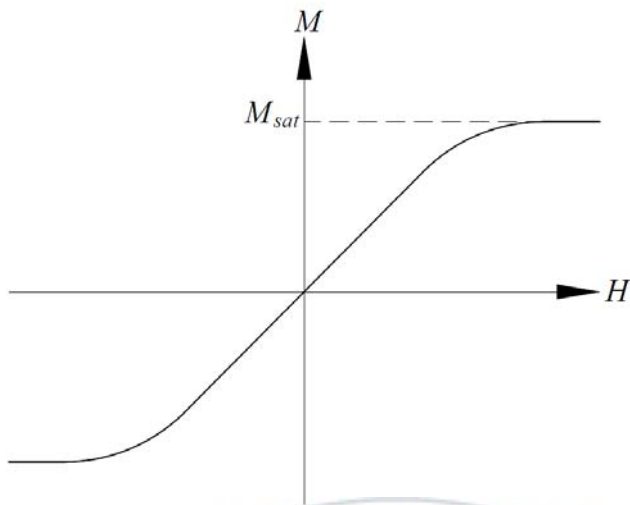


Fig. 2.8 Magnetization curves for SUS304

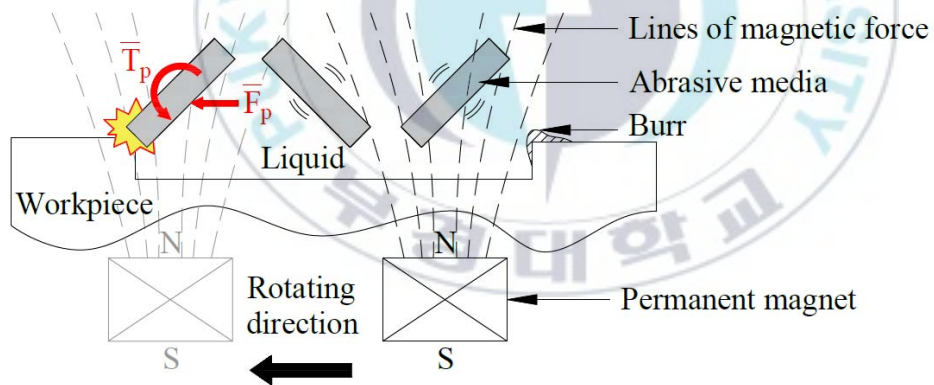


Fig. 2.9 Mechanism of pins' behavior in magnetic field

2.3 회색관계 분석법

2.3.1 회색시스템 이론

회색시스템 이론(Grey system theory, GST)은 1982년 Deng에 의해 제안된 이론으로써 구조, 작동 메커니즘, 행동 특성과 관련하여 부정확하고 불완전한 정보를 포함하고 있는 불확실한 시스템의 상태에 대해 이해하고 예측하기 위하여 제안되었다. GST에서는 정보의 상태를 검은색, 흰색, 회색과 같이 3가지로 분류할 수 있다. 시스템에 대한 정보가 전혀 없는 상태를 검은색, 완벽하게 정보가 존재하는 상태를 흰색으로 정의하고, 정보의 일부가 명확하지 않은 상태를 회색으로 정의한다. 위와 같은 회색 이론의 정의에 따라 불완전하고 불분명한 정보를 갖는 시스템을 GST라 한다^[71-75].

GST의 가장 큰 장점은 자료의 양, 직경, 분포에 제약을 받지 않기 때문에 불분명하고 적은 양의 정보를 갖고 있는 시스템에 대해 효율적으로 분석이 가능하다. 이러한 회색 시스템과 관련된 주요 용어로 회색관계, 회색요소, 회색수가 있다. 회색관계는 불분명한 정보들 사이의 관계를 의미하고, 회색요소는 불완전한 정보의 요소를 회색수는 부족한 정보의 수를 말한다^[76-80].

2.3.2 회색관계 분석

GRA는 GST에서 파생된 이론으로 서로 다른 목표값을 가지는 데이터들의 실험 결과를 바탕으로 다목적 함수와 인자들의 상관 정도를 분석하는 방법이다^[81-86]. 본 연구에서는 다구찌 실험계획법을 활용하여 GRA를 수행하였으며 실험 절차는 아래 및 Fig. 2.10과 같다.

- (1) 주요인자의 개수와 수준을 고려하여 직교배열표를 구성하고 실험을 수행한다.
- (2) 다구찌 실험계획법을 바탕으로 얻어진 데이터를 목적 함수별 손실 함수의 특성을 나타내는 S/N비로 계산한다.
- (3) S/N비로 산출된 값을 GRA에 활용하기 위하여 0과 1사이의 값으로 정량화한다. 이를 회색관계 형성(Grey relational generating) 혹은 데이터 전처리 과정(Data pre-processing)이라 한다.
- (4) 회색관계 형성 단계를 거친 값들은 0과 1사이의 값으로 모두 변환되고 최적 조건을 도출하기 위하여 이상 목표값인 1과의 편차를 계산한다.
- (5) 이상 목표값과 실제 값의 관계를 나타내는 회색상관 계수(Grey relational coefficient)를 계산한다.
- (6) 목적별로 계산된 회색상관 계수를 활용하여 회색관계 등급(Grey relational grade)을 산출한다.

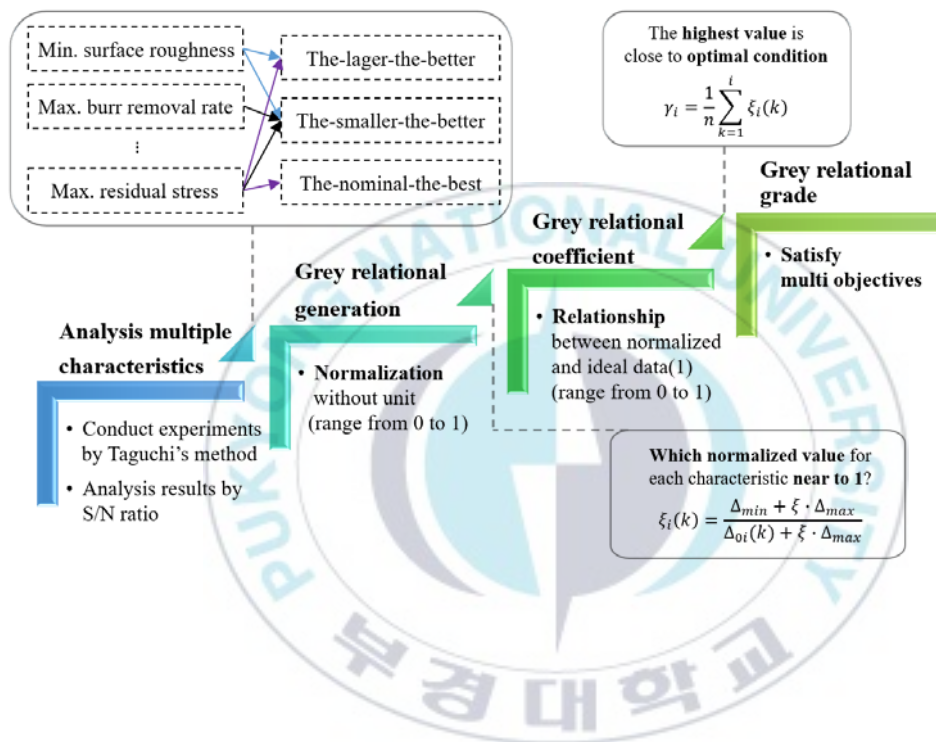


Fig. 2.10 Procedures of grey relational analysis

2.3.3 회색관계 형성

회색관계 이론은 서로 다른 목적을 가지는 다목적 함수의 분석을 통해 주요인자의 상관관계를 파악하고 최적 조건을 도출하는 분석법이다. 그렇기 때문에 상이한 기준의 척도를 가지는 목적 함수의 결과값을 사용할 경우 부정확한 분석을 야기할 수 있다.

따라서 정확한 분석을 위하여 실험에서 도출된 결과값을 정규화하는 단계를 거쳐야 한다. 이를 회색관계 형성 또는 데이터 전처리 과정이라 정의하고 정규화된 값은 0과 1 사이의 값으로 나타낼 수 있다. 목표값의 특성에 따라 망대특성, 망소특성, 망목특성으로 나눌 수 있고 각각의 특성은 아래와 같이 전처리 과정을 거친다^[87-90]. Fig. 2.11과 Fig. 2.12는 회색관계 형성을 적용하지 않은 최적화 방법과 회색관계 형성을 통해 데이터를 정규화한 것을 도식화 한 것이다.

(1) 망대특성

$$x_i^*(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (2.11)$$

(2) 망소특성

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (2.12)$$

(3) 망목특성

$$x_i^*(k) = \frac{|x_i(k) - x|}{\max x_i(k) - x} \quad (2.13)$$

여기서, $x_i^*(k)$ 는 전처리 과정을 통해 변환된 값을 나타내고 $x_i(k)$ 는 실험계획법에 따라 실험한 결과값, x 는 목표값을 의미한다. $\max x_i(k)$ 와 $\min x_i(k)$ 는 각각 변환된 값의 최댓값과 최솟값을 의미한다.



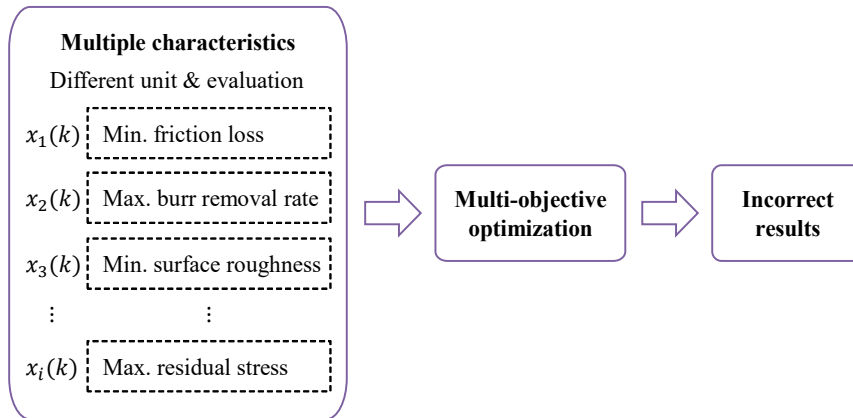


Fig. 2.11 Multi-objective optimization without GRA

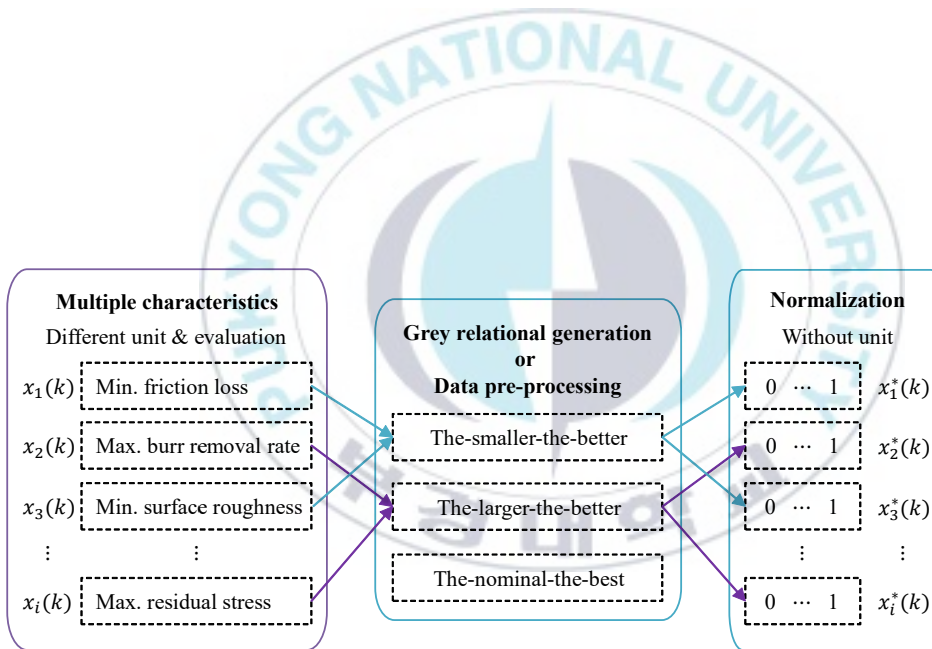


Fig. 2.12 Grey relational generating for multiple characteristics

2.3.4 회색관계 계수 및 회색관계 등급

데이터 전처리 과정을 통해 정규화된 값 중 이상 목푫값 1에 근사한 값을 찾기 위하여 회색관계 계수, $\xi_i(k)$,를 아래 식 (2.14)를 통해 도출할 수 있다^[91-97].

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \cdot \Delta_{\max}} \quad (2.14)$$

여기서, 구별 계수 ξ 는 minimum information 법칙에 따라 통상 0.5로 적용된다. $\Delta_{0i}(k)$ 는 이상적인 목푫값 $x_0^*(k)$ 와 전처리 값 $x_i^*(k)$ 의 편차를 나타내고, 식 (2.15)와 같이 나타낼 수 있다. $x_0^*(k)$ 는 목푫값의 특성에 관계없이 통상 1로 적용된다. $\Delta_{\max}$ 와 $\Delta_{\min}$ 는 각각 편차의 최대값과 최소값을 의미하고 식 (2.16)과 식 (2.17)로부터 산출된다.

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (2.15)$$

$$\Delta_{\max} = \max\{\Delta_{0i}(k), i = 1, 2, \dots, m\} \quad (2.16)$$

$$\Delta_{\min} = \min\{\Delta_{0i}(k), i = 1, 2, \dots, m\} \quad (2.17)$$

회색관계 등급은 모든 목적 함수를 고려하여 이상 목푫값과 비교한 데이터로 높은 값일수록 최적 조건임을 의미하며 아래 식과 같이 도

출된다.

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^i \xi_i(k) \quad (2.18)$$



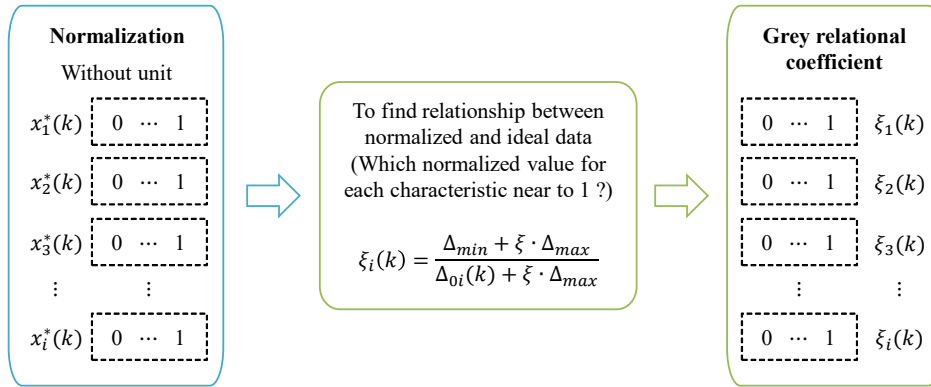


Fig. 2.13 Process of grey relational coefficient

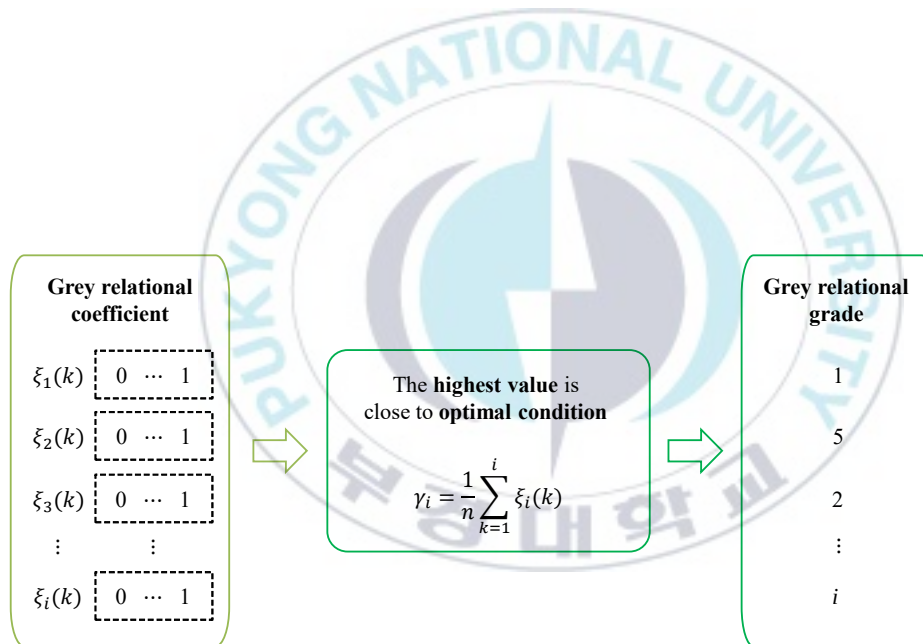


Fig. 2.14 Process of grey relational grade

3. 전자연마의 자기장 분포 시뮬레이션

3.1 작업공간에서 자기장 분포

3.1.1 실험계획 및 구성

전자연마 공정에서 자기 원판 디스크로 인해 발생된 자기력이 공작물의 표면거칠기와 디버링 향상에 미치는 영향을 평가하기 위하여 자기 원판 디스크와 영구자석의 형상을 모델링하고 유한요소해석 툴인 Ansys workbench를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3.1과 Table 3.1은 전자연마 기기의 형상과 사양을 나타낸 것으로 모델의 형상 및 치수는 실제 제작된 기기와 동일하게 모델링 하였다.

Table 3.2는 본 연구에서 선택한 인자와 수준을 나타내고 있다. 선정된 인자들은 자기력 세기 변화에 큰 영향을 주는 인자로써 자석의 형태, 자석의 수, 자석의 위치 반경, 원형 수조와 자기 원판 디스크 사이의 간극으로 설정하였다. 자기 원판 디스크에 설치되는 영구자석의 형태는 원형, 사각형, 반원형 고리 모양으로 전체 체적은 자석의 모양에 관계없이 약 $7,850\text{mm}^2$ 으로 동일하다. 자석의 수는 3, 4, 5개로 선정하였고 위치 반경은 원형 수조의 중심을 기준으로 120, 180, 240mm로 설정하였다. 간극은 연마 핀의 거동에 영향을 미치는 자기력 세기를 고려하여 135, 150, 165mm로 선정하였다. 최적 조합 조건을 찾기 위하여 총 81번의 시뮬레이션 수행을 통해 자기장 세기 및 분포도를 분석하였다.

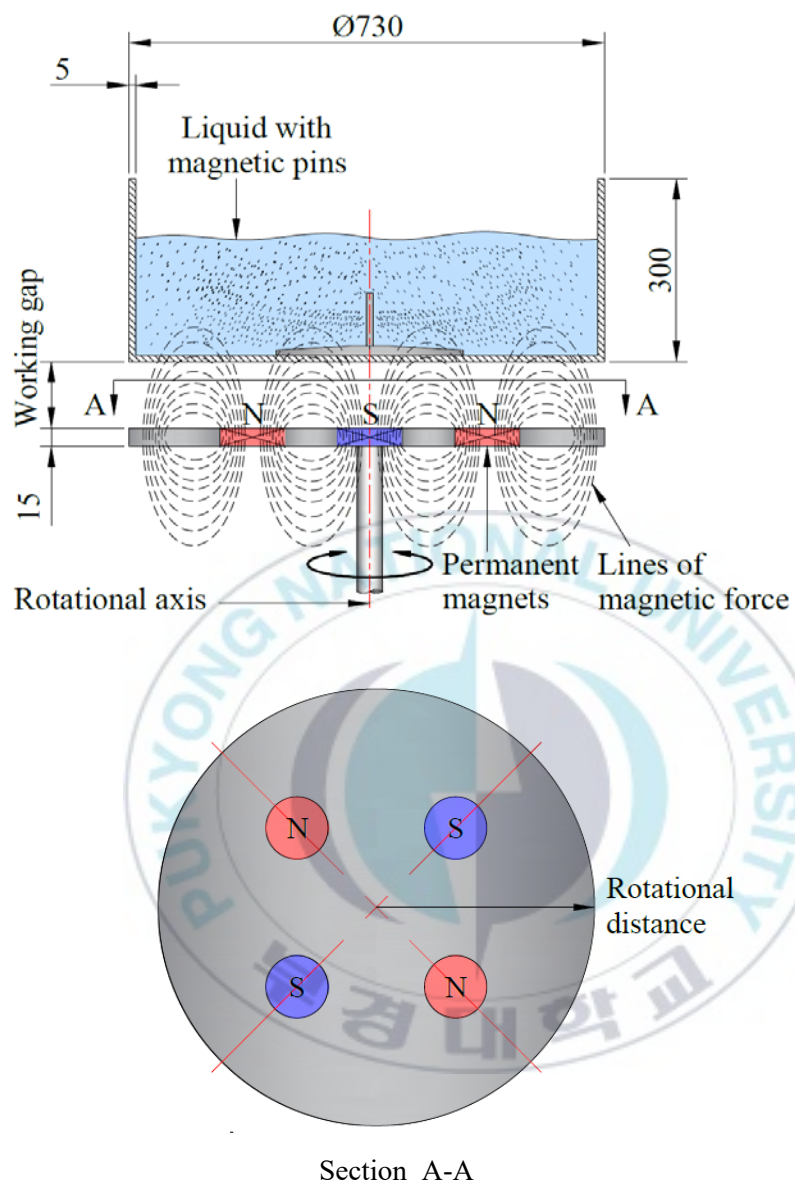


Fig. 3.1 Schematic diagram of an EMF apparatus

Table 3.1 Fixed process parameters

Items	Conditions
Diameter of container(mm)	730
Height of container(mm)	300
Thickness of container(mm)	5
Permanent magnet	Nd-Fe-B(N35)
Thickness of magnet(mm)	15
Area of magnet(mm ²)	7,850

Table 3.2 Experimental factors and levels

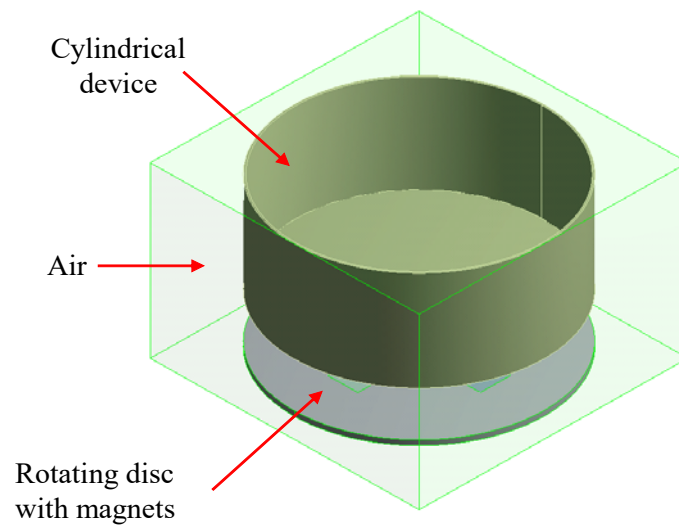
Factors	Levels		
	1	2	3
Shape of magnet, A	Circle	Square	Half ring
The number of magnets(ea), B	3	4	5
Radial distance from center(mm), C	120	180	240
Working gap(mm), D	135	150	165

3.1.2 시뮬레이션 경계조건

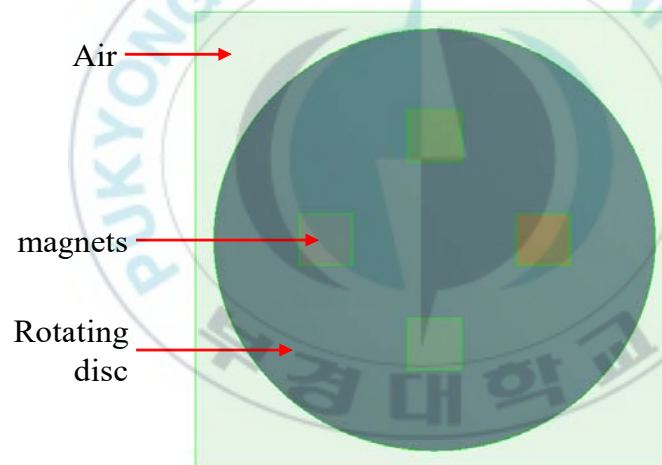
Fig. 3.2는 전자연마 공정에 사용되는 기기의 구성품인 원형 수조, 자기 원판 디스크, 영구자석을 UG NX11을 이용하여 모델링 하고 이를 Ansys workbench로 불러온 형상이다.

각 조건에 따른 자속밀도의 세기를 분석하기 위하여 Table 3.3과 Fig. 3.3과 같이 해석 조건을 설정하였다. 해석 모델은 평균 450,000개의 요소와 344,000개의 노드로 이루어져 있다. 자기 원판 디스크의 영구자석으로부터 자기장이 발생되고 형성된 자기장이 원형 수조 내 자기장 분포에 영향을 미치기 때문에 정확한 시뮬레이션 결과 도출을 위하여 영구자석과 원형 수조의 메쉬 직경은 10mm로 선정한다. 자기 원판 디스크와 원형 수조를 감싸는 공기의 메쉬 직경은 40mm로 구성 되어 있다.





(a)



(b)

Fig. 3.2 3D modeling of the EMF device

Table 3.3 Boundary conditions for simulation

Items		Conditions
Elements		455,196
Nodes		334,077
Mesh size(mm)	Air	40
	Cylindrical device	10
	Magnet	10
Structural steel	Isotropic relative permeability	10,000
	Isotropic resistivity(kgm ³ /A ² s ³)	1.70e-7
Nd-Fe-B(N35)	Coercive force(A/m)	8.67e5
	Residual induction(gauss)	11,900
Air	Isotropic relative permeability	1

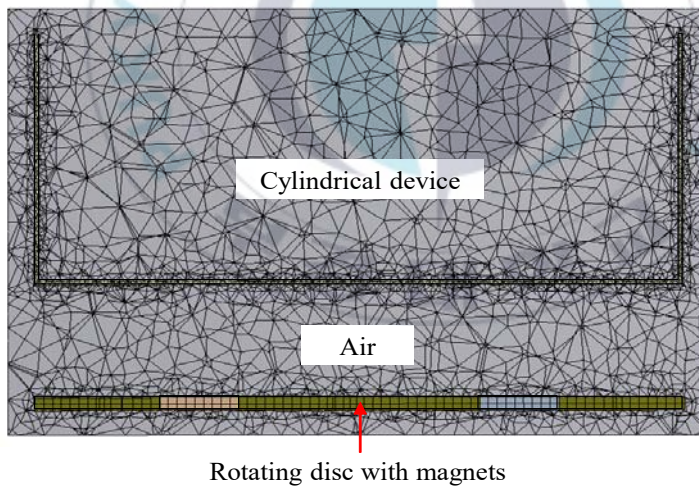


Fig. 3.3 Mesh modeling of the EMF device

3.1.3 시뮬레이션 분석 결과

본 연구에서는 Table 3.2에 기술된 인자와 수준에 따라 완전 요인 배치법으로 영구자석 형태 변화에 따라 총 81번의 시뮬레이션을 수행하였다. 각 조건별 최대 자속밀도의 세기는 Table 3.4와 같다.

자석 모양에 따른 자속밀도의 세기를 분석한 결과, Fig. 3.4와 같이 사각 모양일 때 평균 자속밀도가 59.5mT로 가장 높음을 알 수 있었다. 식 (2.5)와 식 (2.7)에 의해 연마 핀의 거동은 자기력의 세기에 영향을 받으므로 본 연구에서 고려된 영구자석의 형태 중 연마공정에 적합한 형태는 최대 자속밀도를 가지는 사각형임을 알 수 있었다.

최적화된 형태인 사각자석을 기준으로 연마기기의 중심 부분에서부터 자석의 중심 부분까지의 위치 반경에 따른 자기장의 분포를 분석하였다. 자기력의 세기뿐만 아니라 자기장의 균일한 분포 또한 가공 효율에 영향을 미치기 때문에 각 위치 반경에서 측정된 자속밀도 값을 평균하여 최적 위치 반경을 선정하였다. Fig. 3.5는 4개의 사각자석이 자기 원판 디스크에 설치되고 간극이 135mm일 때 평균 자기장의 세기를 나타낸 값이다. 위치 반경이 180mm일 때 평균 자속밀도가 40.4mT로 다른 두 조건 대비 높음을 확인할 수 있었다.

Fig. 3.6은 자기 원판 디스크와 원형 수조 간의 간극 변화에 따른 자기장의 분포를 나타낸다. 조건은 상기 언급된 인자들의 최적 조건인 자석 수 4개, 위치반경 180mm을 기준으로 자속밀도의 분포가 대칭 형태를 나타내는 조건에 대해 분석하였다. 간극이 135mm일 때 70.8mT로 최대 자속밀도가 측정되었고 이를 통해 간극이 좁을수록 자속밀도가 높아지는 현상이 뚜렷이 나타남을 볼 수 있었다.

시뮬레이션 결과를 바탕으로 자석 수에 따른 자기장의 분포 및 자속밀도의 세기는 Fig. 3.7, Fig. 3.8, Fig. 3.9와 같다. Fig. 3.7은 자석 수가 3개일 때 자기장의 분포와 자속밀도의 세기를 나타낸 것이다. 원형 수조의 중심과 가까운 부분에서 최대 자속밀도의 세기인 67.2mT를 나타내었고 전체적인 자기장의 분포는 중심에 치우친 형태로 나타나 마무리 공정 시 공작물이 놓인 위치 반경에 따라 표면 상태의 변화가 불균일할 것으로 판단된다. Fig. 3.8은 자석 수가 4개일 때 자기장의 분포와 자속밀도의 세기를 나타낸 것이다. 자기장의 분포는 회전축을 중심으로 외곽 부분에 이르기까지 양방향 모두 대칭 형태를 나타내었다. 최대 자속밀도는 70.8mT로 중심으로부터 위치 반경이 180mm인 부분에서 발생되었다. Fig. 3.9는 자석 수가 5개일 때 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 최대 자속밀도는 85.9mT로 나머지 두 조건 대비 가장 높게 측정되었지만 전 영역에 걸쳐 자속밀도의 분포가 불균일하여 공정 성능의 향상을 기대하기 어렵다.

따라서 전자연마 공정에서 자기장의 분포가 대칭적이고 자속밀도가 높게 측정되는 조건은 총 4개의 사각자석이 자기 원판 디스크의 회전 축 중심에서 180mm 떨어진 곳에 설치되고 원통 수조와의 간극이 135mm일 때임을 알 수 있었다.

Table 3.4 Derived results in simulation for magnetic flux density

Exp. no.	Factors				Max. magnetic flux density(mT)	Ave. magnetic flux density(mT)
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	91.57	32.56
2	1	1	2	1	66.18	28.90
3	1	1	3	1	49.76	22.00
4	1	2	1	1	68.13	32.44
5	1	2	2	1	70.22	38.41
6	1	2	3	1	55.38	35.25
7	1	3	1	1	83.81	25.31
8	1	3	2	1	84.57	26.96
9	1	3	3	1	70.85	23.51
10	1	1	1	2	73.75	26.67
11	1	1	2	2	56.55	24.41
12	1	1	3	2	41.84	18.79
13	1	2	1	2	51.11	24.05
14	1	2	2	2	56.86	32.74
15	1	2	3	2	47.20	30.16
16	1	3	1	2	64.81	19.70
17	1	3	2	2	67.92	21.88
18	1	3	3	2	60.07	19.30
19	1	1	1	3	60.28	22.08
20	1	1	2	3	48.62	20.59
21	1	1	3	3	35.70	16.30
22	1	2	1	3	38.88	20.07
23	1	2	2	3	46.16	27.08
24	1	2	3	3	40.72	26.39
25	1	3	1	3	50.73	15.95
26	1	3	2	3	55.09	17.41
27	1	3	3	3	50.50	15.99

Exp. no.	Factors				Max. magnetic flux density(mT)	Ave. magnetic flux density(mT)
	A	B	C	D		
28	2	1	1	1	92.47	32.76
29	2	1	2	1	67.20	29.18
30	2	1	3	1	50.56	21.98
31	2	2	1	1	67.99	33.75
32	2	2	2	1	70.76	40.36
33	2	2	3	1	55.85	35.13
34	2	3	1	1	85.55	25.50
35	2	3	2	1	85.92	27.94
36	2	3	3	1	71.85	24.26
37	2	1	1	2	75.16	27.18
38	2	1	2	2	57.49	24.79
39	2	1	3	2	42.42	18.88
40	2	2	1	2	50.90	26.61
41	2	2	2	2	57.40	33.72
42	2	2	3	2	47.70	31.09
43	2	3	1	2	66.34	20.41
44	2	3	2	2	69.37	22.55
45	2	3	3	2	59.47	18.81
46	2	1	1	3	61.33	22.48
47	2	1	2	3	49.24	20.81
48	2	1	3	3	36.31	16.38
49	2	2	1	3	38.74	20.67
50	2	2	2	3	46.45	28.14
51	2	2	3	3	41.26	27.52
52	2	3	1	3	51.97	16.55
53	2	3	2	3	56.10	18.01
54	2	3	3	3	51.55	16.63

Exp. no.	Factors				Max. magnetic flux density(mT)	Ave. magnetic flux density(mT)
	A	B	C	D		
55	3	1	1	1	87.13	31.81
56	3	1	2	1	64.63	28.44
57	3	1	3	1	48.50	21.45
58	3	2	1	1	70.99	29.34
59	3	2	2	1	55.34	37.89
60	3	2	3	1	40.86	34.46
61	3	3	1	1	58.22	26.36
62	3	3	2	1	47.63	27.22
63	3	3	3	1	35.05	23.88
64	3	1	1	2	61.25	26.26
65	3	1	2	2	68.47	23.94
66	3	1	3	2	54.99	24.01
67	3	2	1	2	45.47	23.27
68	3	2	2	2	54.87	32.23
69	3	2	3	2	47.28	30.83
70	3	3	1	2	34.24	20.82
71	3	3	2	2	44.19	21.80
72	3	3	3	2	40.58	19.52
73	3	1	1	3	81.36	20.38
74	3	1	2	3	80.91	15.96
75	3	1	3	3	70.65	29.34
76	3	2	1	3	64.03	18.38
77	3	2	2	3	65.17	26.72
78	3	2	3	3	58.97	26.93
79	3	3	1	3	50.87	16.41
80	3	3	2	3	52.53	17.41
81	3	3	3	3	49.80	16.43

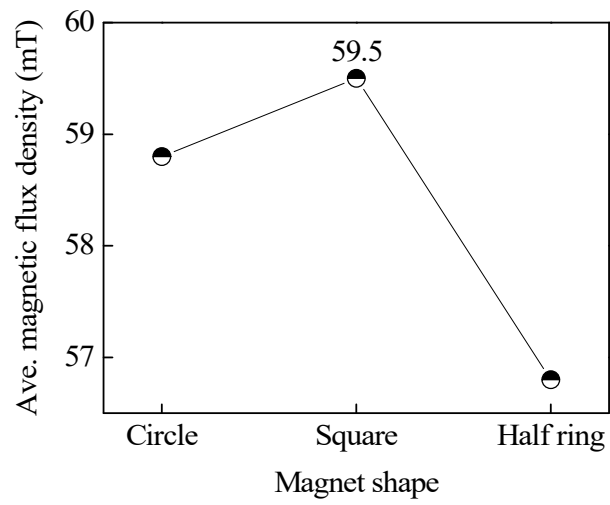


Fig. 3.4 Averaged magnetic flux density of magnet shape

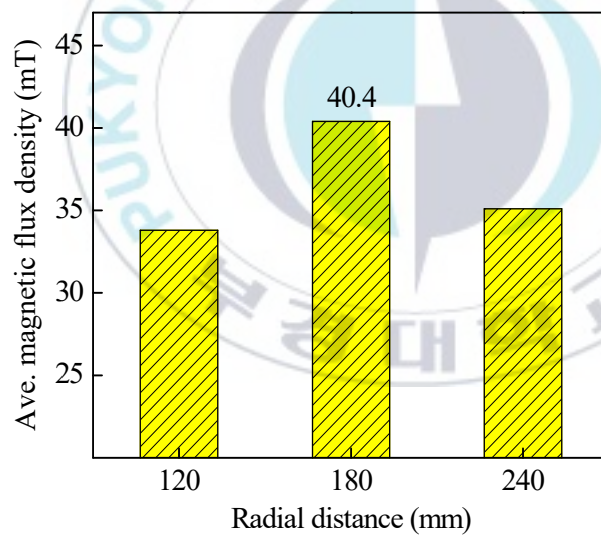


Fig. 3.5 Averaged magnetic flux density of radial distance

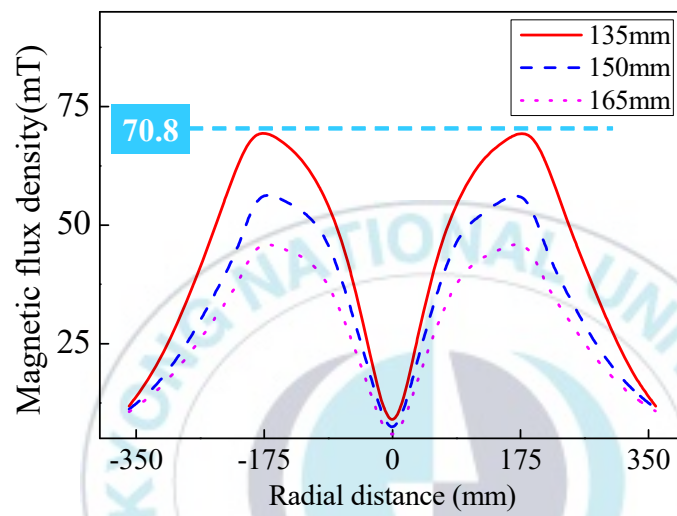
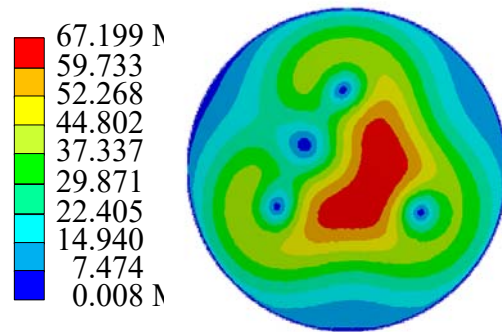
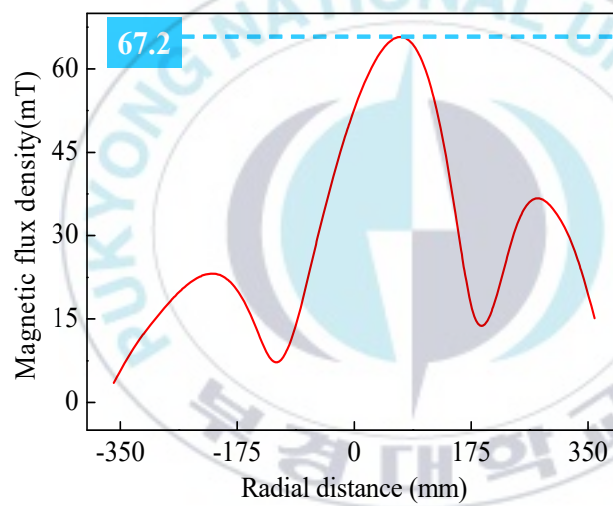


Fig. 3.6 Magnetic flux density distribution of working gap

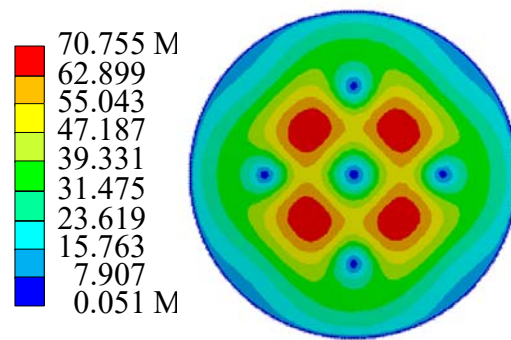


(a) Simulation result of magnetic flux density

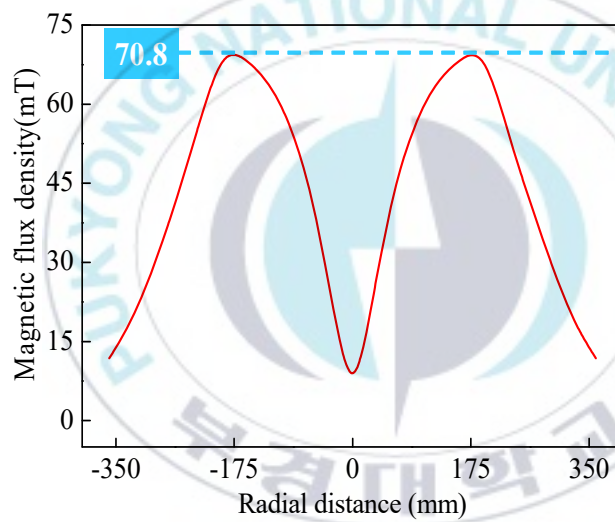


(b) Magnetic flux density distribution

Fig. 3.7 Magnetic flux density for 3 pieces of magnets

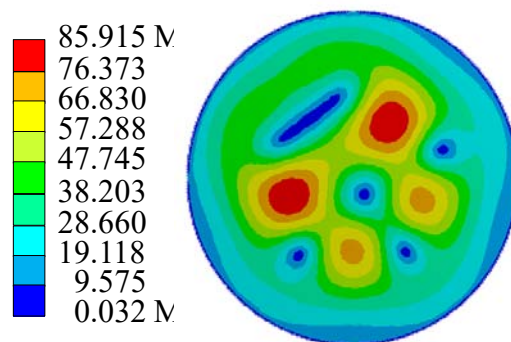


(a) Simulation result of magnetic flux density

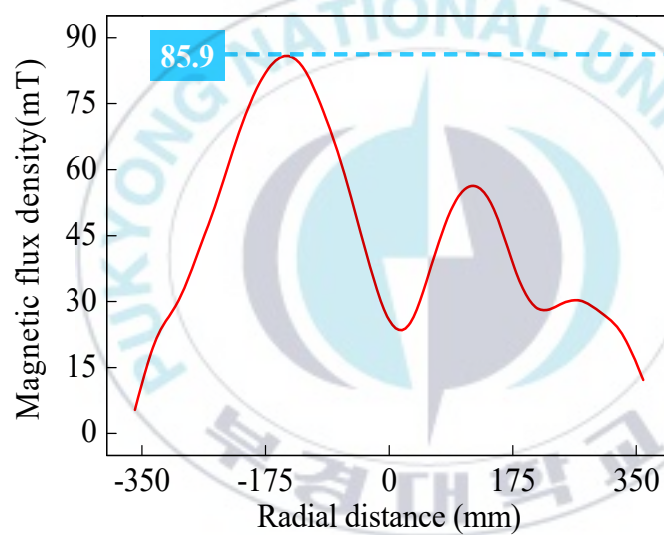


(b) Magnetic flux density distribution

Fig. 3.8 Magnetic flux density for 4 pieces of magnets



(a) Simulation result of magnetic flux density



(b) Magnetic flux density distribution

Fig. 3.9 Magnetic flux density for 5 pieces of magnets

3.2 극성변화에 따른 자기장 분포

효율적인 연마가공을 위하여 영구자석의 극성 변화에 따른 자속밀도의 분포를 확인하였다. 시뮬레이션 경계조건은 Table 3.3과 동일하며 연마기기에 대한 조건은 3.1.3장에서 도출된 각 인자의 최적 조건인 사각 형태의 영구자석 4개, 위치 반경 180mm, 간극 135mm를 기준으로 평가하였다.

자기 원판 디스크에 설치된 4개의 영구자석이 모두 동일하게 NNNN극으로 배치될 때에는 Fig. 3.10과 같이 자속밀도의 분포가 반경의 양쪽 외곽 부분에 치우치는 현상을 확인할 수 있으며 최대 자속밀도는 51.7mT로 산출되었다. 이는 동일 방향으로 향하는 자기력선의 중첩 현상으로 자속밀도가 상대적으로 낮게 나타남을 판단할 수 있다.

Fig. 3.11은 N극과 극이 서로 이웃하는 NNSS극으로 배치될 때 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 자기력선의 성질에 따라 같은 극 NN극과 SS극으로 배열된 부분에서 척력이 작용하여 자속밀도가 감소하였고 반대극인 NS극 배열에서 자기력이 증대되는 현상을 확인할 수 있었다. 하지만 자기장의 분포가 연마기기의 중심에 치우쳐져 있어 공정 효율의 향상에 한계가 있을 것으로 판단된다.

반면에 N극과 S극이 교차 배열할 경우, Fig. 3.12와 같이 중심부에서 가장 낮은 자속밀도가 측정되었고 가장 높은 자속밀도는 영구자석 중심과 원통 수조 중심의 거리가 180mm일 때 약 68mT로 측정되었다. 이는 교차 배열된 영구자석 간 인력에 의해 자기력의 세기가 향상된 것으로 볼 수 있다.

Fig. 3.13은 본 연구에서 고려된 영구자석 극 배열에 따른 자기장의 분포 특성을 나타낸 것이다. 자기 원판 디스크에 부착된 영구자석의 직경, 개수, 위치는 3.3장에서 도출된 최적 조건에 따라 총 4개의 사각자석이 연마기기의 중심에서 180mm 떨어진 곳에 설치된다. 자기 원판 디스크와 원통 수조의 간극은 135mm이다. 영구자석이 NSNS극일 때 자기장은 회전 반경에 따라 고르게 분포하는 종 모양으로 형성됨을 확인할 수 있었다. 이는 모두 같은 극성을 배열할 때보다 N극과 S극이 교차할 때 높은 자속밀도와 균일한 분포를 나타내는 것으로 판단할 수 있다. 또한 Fig. 3.14와 같이 실제 연마기기에서 자속밀도 측정기(TM301, KANNTec)를 이용하여 측정된 자속밀도의 세기 및 분포와 유사하여 본 연구에서 도출된 시뮬레이션 결과가 신뢰성을 가짐을 확인 있었다.



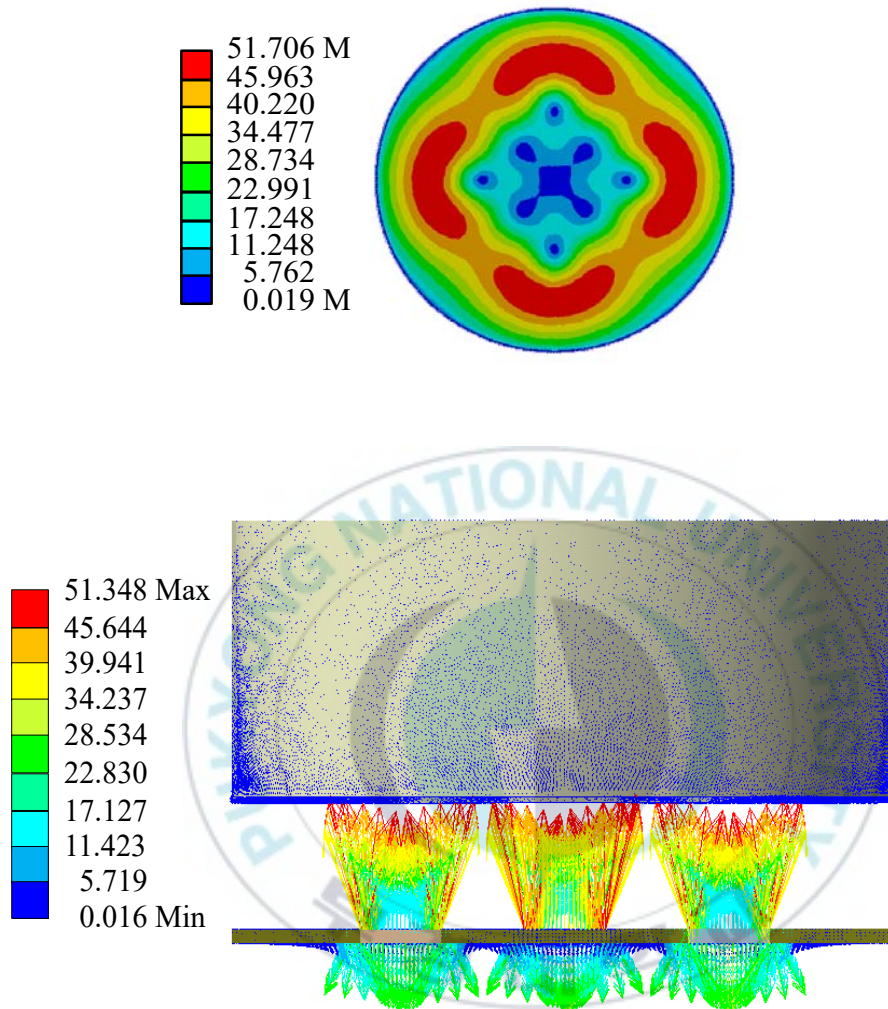


Fig. 3.10 Magnetic flux density distribution at NNNN

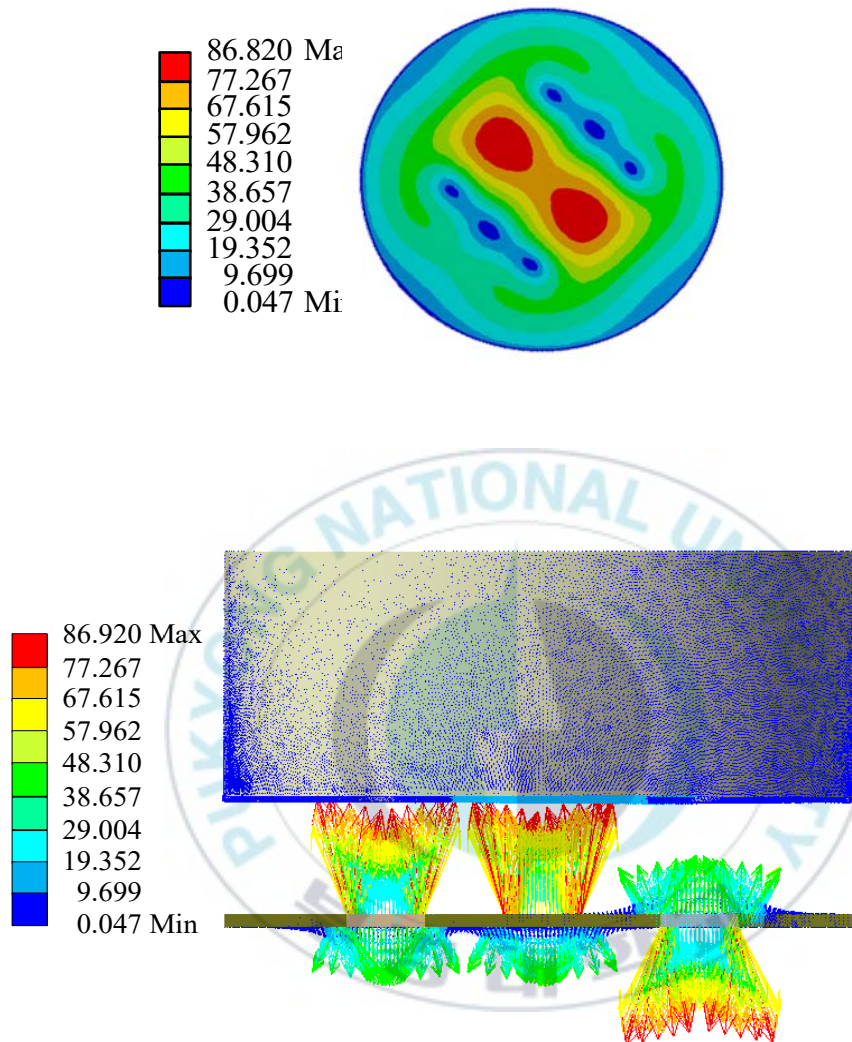


Fig. 3.11 Magnetic flux density distribution at NNSS

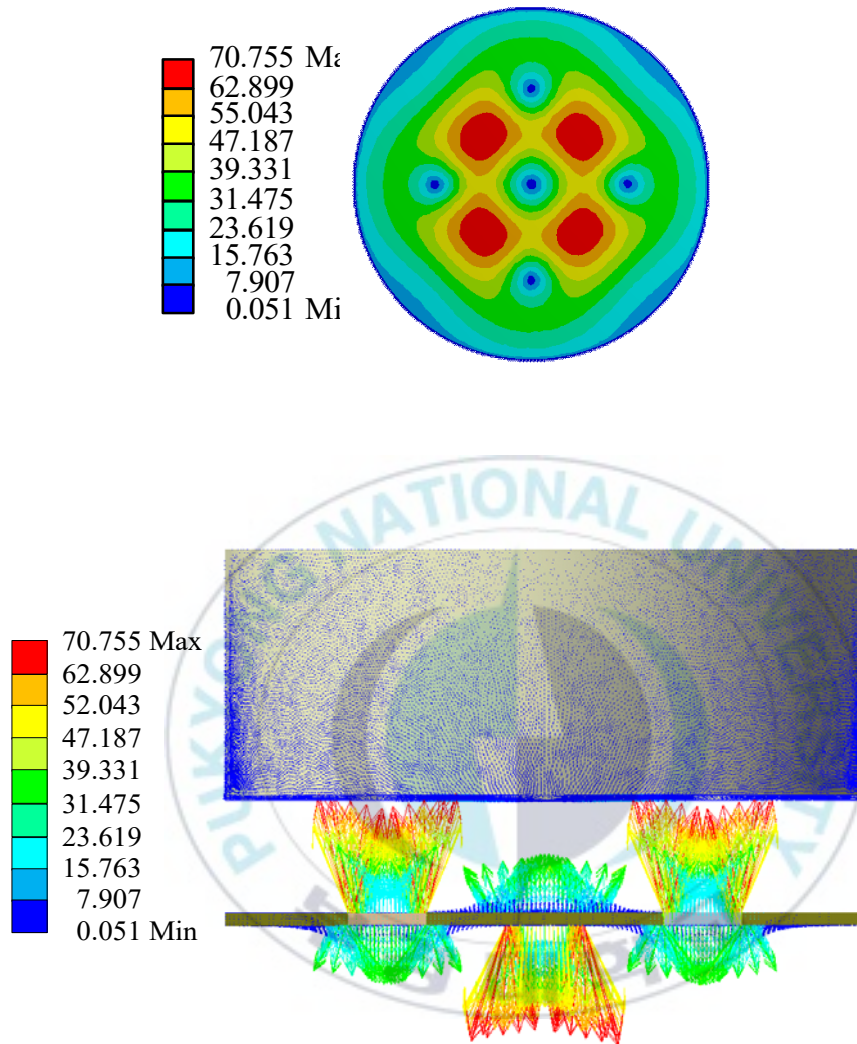


Fig. 3.12 Magnetic flux density distribution at NSNS

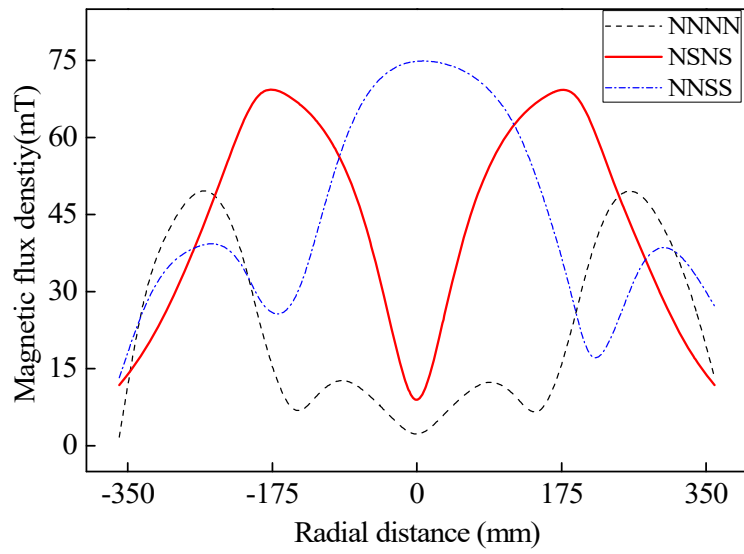


Fig. 3.13 Comparison to magnetic flux density distribution of conducted configuration

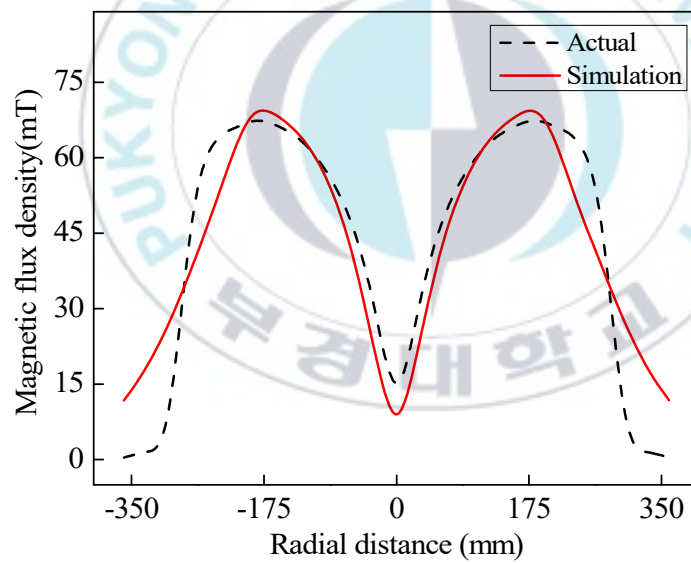


Fig. 3.14 Comparison to magnetic flux density distribution of actual and simulated arrangement

4. 전자연마 표면가공 특성 평가

4.1 실험장치 및 측정방법

본 연구에서는 전자연마 공정이 표면거칠기와 디버링 향상에 영향을 미치는 인자와 인자간의 조건을 알아보기 위하여 자기 원판 디스크의 회전속도, 연마 핀의 무게, 연마 핀의 직경, 가공 시간을 실험 인자로 선정 후 실험계획법을 이용하여 실험을 수행하였다. Photo 4.1은 전자연마 장치의 세부구성 요소이다. 연마액 및 연마 핀의 순환을 위한 원형 수조, 자기에너지를 형성하는 영구자석이 부착된 자기 원판 디스크, 이를 회전하여 자기력을 변화시킬 수 있는 AC모터로 구성되어 있다. 전자연마 장치의 구성 및 사양은 Table 4.1에 나타낸 것과 같다. 원형 수조의 직경은 730mm이지만 본 연구에서 사용되는 시편의 직경, 연마 핀의 유동 등을 고려하여 500mm 내에서 실험을 수행하였다. 자기 원판 디스크는 최대 1,800rpm까지 양방향으로 회전 가능하다. 원판에 부착된 자석은 Nd-Fe-B이며, Fig. 3.14와 같이 수조 중심으로부터 반경이 180mm인 부분에서 가장 높은 자속 밀도인 68mT가 측정되었다.

본 연구에 사용된 공작물의 재질은 Al6061이며 직경은 50x40x5mm이다. 공작물의 화학 조성 및 기계적 성질은 Table 4.2와 Table 4.3에 나타난 바와 같다. 전자연마 공정이 자유곡면을 가지는 난삭재의 폴리싱 및 버 제거 효과에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 실험 수행 전 마이크로 밀링가공을 이용하여 깊이 500 μ m, 폭 6mm의 U채널을 제

작하였다. 가공된 공작물의 형태는 Fig. 4.1과 같다. 채널 제작에 사용된 엔드밀은 2날 flat type 이며 직경은 6mm이다. Table 4.4는 마이크로 엔드 밀링가공에 사용된 가공조건들을 나타내었다.

실험 전 공작물의 표면거칠기와 마이크로 밀링가공 후 발생된 불규칙한 버의 높이를 측정하기 위하여 Photo 4.2와 같이 표면조도계 (SJ-301, Mitutoyo)와 형상측정기(CV-3200, Mitutoyo)를 사용하였다. 측정 방법 및 계측 방향은 Fig. 4.2에 도시된 바와 같다. 데이터 값의 신뢰성을 확보하기 위하여 5mm 간격으로 각기 다른 위치를 선정하여 측정 후 산술 평균으로 평가하였다. Fig. 4.3은 가공 전 표면 상태와 마이크로 밀링가공 후 구간별로 측정된 버의 평균 높이를 나타낸 것으로 계측 방법은 표면거칠기의 측정 방식과 동일하다.





Photo 4.1 Experimental machine of EMF process

Table 4.1 Specification of EMF equipment

Items	Conditions
Diameter of cylinder device(mm)	730
Permanent magnet	Nd-Fe-B
The number of magnets(ea)	4
Max. magnetic flux density(mT)	68
Rotational speed(rpm)	1,800

Table 4.2 Chemical composition(wt. %) of Al6061

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.730	0.304	0.293	0.069	1.025	0.161	0.036	0.024	Bal.

Table 4.3 Mechanical properties of workpiece

Ultimate tensile strength(MPa)	325.0
Yield strength(MPa)	300.0
Elongation(%)	12.6
Brinell hardness(HB)	30.0

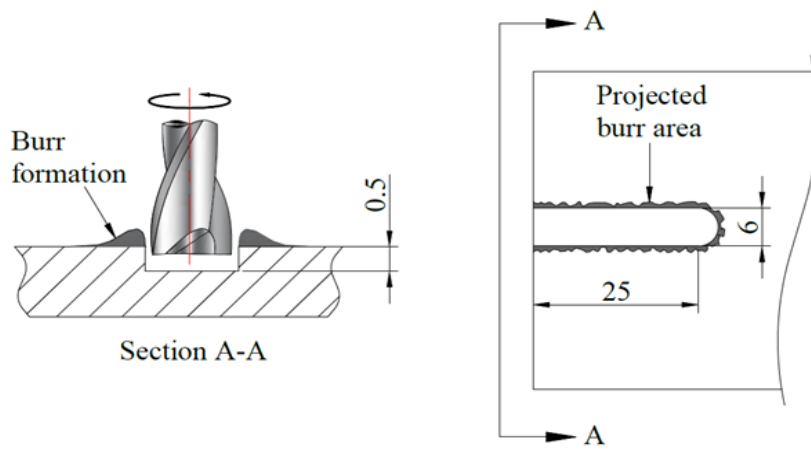


Fig. 4.1 Conducted workpiece and burr formation

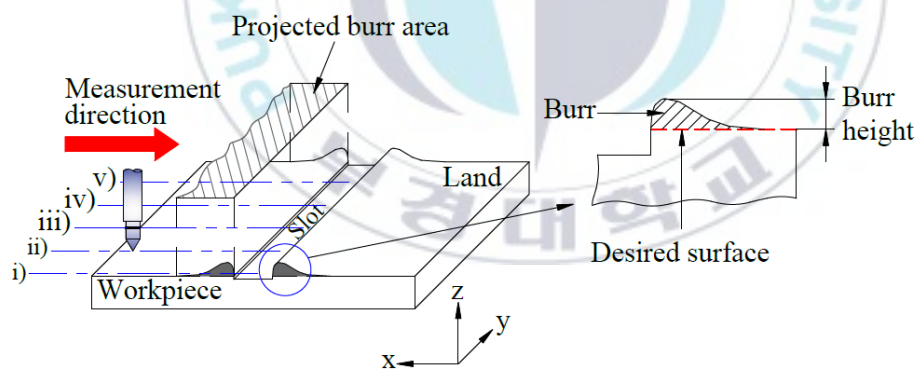


Fig. 4.2 Measuring method and definition of burr height

Table 4.4 Conditions of micro-milling operation

Items	Conditions
Cutting tool	2-flute flat end-mill
Diameter of cutting tool(mm)	6
Spindle speed(rpm)	7,200
Feed rate(mm/min)	80
Total depth(mm)	0.5
Lubricant	Wet condition



(a) Surface roughness tester



(b) Contour measurement

Photo 4.2 Measuring equipment

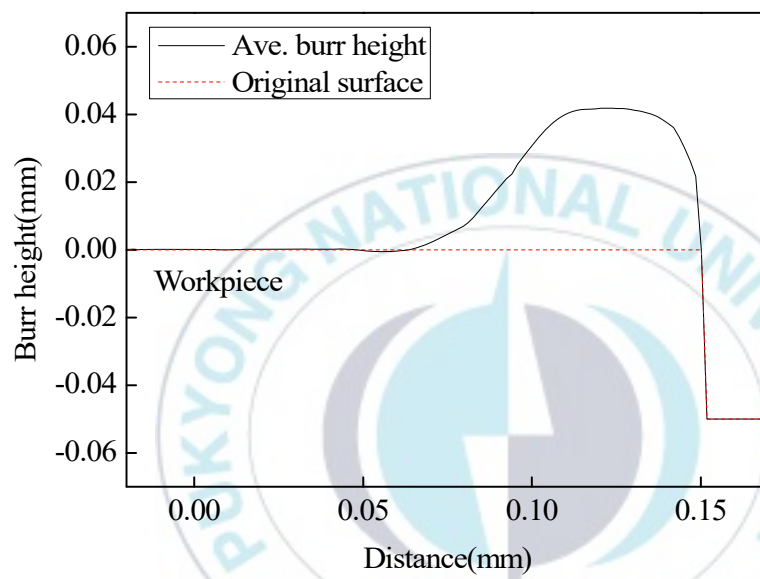


Fig. 4.3 Averaged burr height formed by milling operation

4.2 연마 핀과 가공 시간에 따른 영향 분석

4.2.1 실험의 구성

본 연구에서 제시한 전자연마 공정에서 공작물의 표면 품위 향상은 자기력의 세기 및 분포와 연마 핀의 운동에너지와 밀접한 관계가 있다. 2장에서 언급한 바와 같이 가공 효율에 직결되는 연마재의 운동에너지를 향상시키기 위해 연마 핀에 작용하는 힘과 우력 모멘트가 증대되어야 한다. 식 (2.4)와 식 (2.8)에 따르면 연마 핀의 힘과 우력 모멘트는 연마재의 체적과 자기장의 세기 및 변화에 비례한다.

따라서 본 연구에서는 연마 핀의 직경, 무게와 가공 시간에 따른 연마 특성을 평가하기 위해 Table 4.5를 바탕으로 실험을 수행하였다. 연마 체적에 대한 공정 효율을 평가하고자 하므로 Photo 4.3과 같이 모든 공작물을 동일한 위치 반경에 고정시킨 후 실험 장치에서 구현할 수 있는 최대 조건으로 실험을 실시하였다. 원형 수조 내 공작물이 고정된 위치 반경은 자속밀도 측정기를 통해 최대 자속밀도가 측정된 180mm이고 자기 원판 디스크의 회전 속도는 1,800rpm이다. 연마 핀의 직경은 Al6061 표면 가공에 적합한 0.3, 0.5, 0.7mm로 선정하였고, 무게는 1kg과 2kg으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 연마 핀의 길이는 직경 및 무게에 관계없이 3mm로 고정하였다. 시간에 따른 표면거칠기의 향상 정도를 평가하고자 5분마다 표면거칠기의 변화를 측정하였고 총 20분간 실험을 수행하였다.

Table 4.5 Experimental conditions

Items	Conditions
Rotational speed(rpm)	1,800
Total pin weight(kg)	1.0, 2.0
Diameter of pin(mm)	0.3, 0.5, 0.7
Total working time(min)	20
Located distance from center(mm)	180

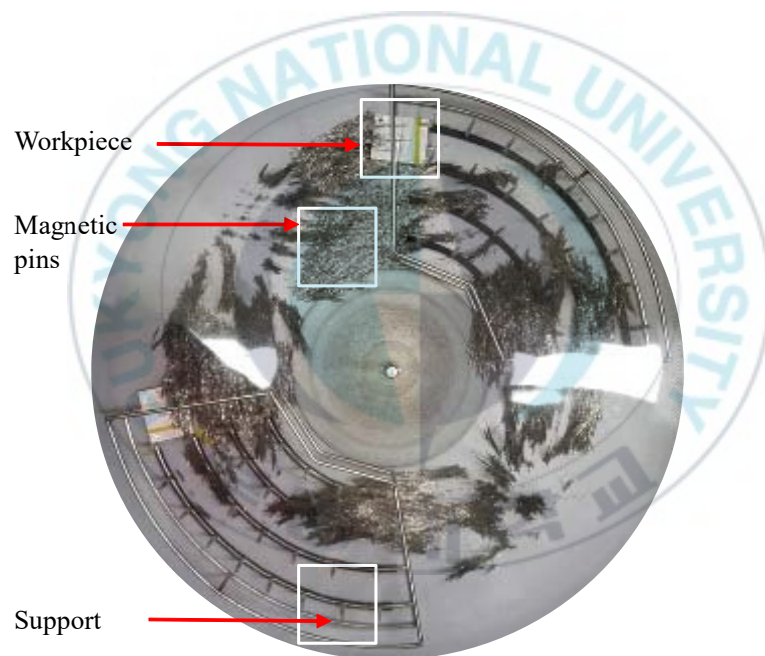


Photo 4.3 Actual arrangement of workpiece with magnetic pins

4.2.2 평가 결과

Fig. 4.4와 Fig. 4.5는 사용된 연마 핀의 총 무게가 각각 1kg과 2kg 일 때 공작물의 표면거칠기 변화를 나타낸 것이다.

연마 핀의 무게가 클수록 단위면적당 표면 연마에 참여하는 입자의 수가 증가함으로써 표면거칠기 향상과 선형적인 관계를 보인다. 무게에 따라 표면 평탄도의 향상 정도는 다르지만 가공 시간이 길어짐에 따라 Al6061의 표면거칠기 값은 현저히 낮아지는 경향은 동일하게 나타남을 알 수 있었다. 그러나, 2kg 이상의 무게에서는 가공 효율이 개선되지 않음을 확인하였는데, 이는 연마입자간의 상호 충돌로 인해 입자의 운동에너지가 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 연마 핀 무게는 가공 효율에 영향을 미치는 인자임을 확인하였고 후속 실험에서 연마 핀의 무게는 2.0kg이하로 한정하였다.

연마 핀의 운동 특성은 연마 핀의 직경에 영향을 받는다. 이는 자기장 내에서 연마 핀에 작용하는 힘과 토크가 체적에 비례하기 때문이다. 즉, 길이가 고정된 원통형 핀의 경우 직경이 작을수록 전체 체적이 감소하여 핀의 운동에너지가 감소하고 직경이 클수록 체적의 증가로 핀의 운동에너지가 증가함으로써 공작물 표면을 큰 힘으로 타격하게 된다. 연마 핀의 직경에 따른 표면의 평탄도 분석 결과 무게에 관계없이 핀의 직경이 모두 0.5mm일 때 표면거칠기가 가장 크게 향상됨을 알 수 있었다. 0.3mm는 연마 핀에 작용하는 힘과 우력 모멘트가 현저히 낮기 때문에 표면의 평탄화에 영향을 적게 미치게 된다. 0.7mm의 경우 체적 증가에 따라 표면을 타격하는 힘이 과도하게 작용함으로써 가공 후 표면이 거칠어지는 것으로 판단된다.

또한 15분 이후에 공작물의 표면거칠기의 향상에는 한계가 나타나 더 이상 표면거칠기의 변화에 영향을 미치지 못하기 때문에 후속 실험에서는 가공 시간을 15분 이하로 한정하였다.



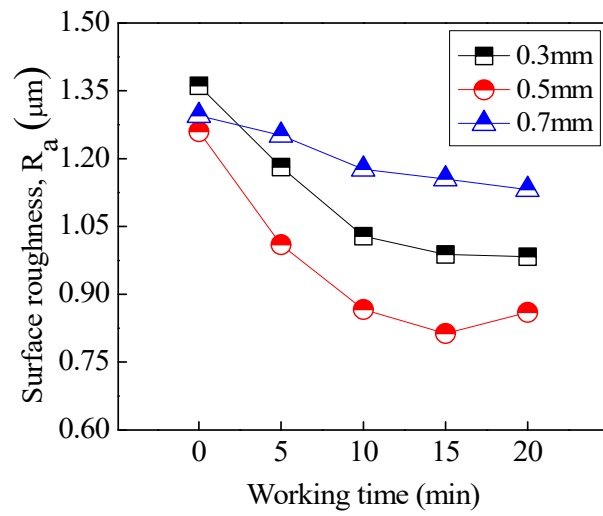


Fig. 4.4 Change in surface roughness at 1kg

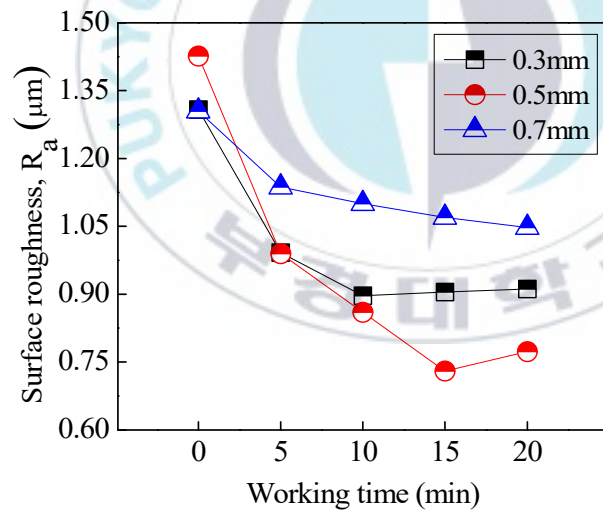


Fig. 4.5 Change in surface roughness at 2kg

4.3 표면거칠기 향상과 디버링 효과 분석

4.3.1 실험의 구성

본 연구에서는 전자연마 공정에서 각각의 인자들이 표면거칠기와 버의 제거 정도에 어느 정도 영향을 미치는지 평가하기 위하여 실험 계획법을 이용하였다. 실험횟수를 최소화하고 선정된 인자들이 실험 결과에 미치는 영향을 효과적으로 평가하기 위하여 다구짜 직교 배열표를 구성하여 실시하였다. 각 실험조건에 대한 결과값으로 표면거칠기와 버의 높이 형상을 실험 전 측정 방식과 동일한 기준으로 측정하였으며, 각 인자들이 결과값에 미치는 영향을 평가하였다.

Table 4.6은 본 연구에서 선택한 인자와 수준을 나타내고 있다. 인자들은 기초실험을 통해 전자연마 공정의 가공 효율 향상에 직접적으로 연관된 자기에너지와 운동에너지를 증대시키는 인자들로 선정했다. 선정된 인자는 큰 영향을 주는 자기 원판 디스크의 회전속도, 연마 핀의 무게, 연마 핀의 직경, 가공 시간이다. 실험 수준의 범위는 선행 연구에서 나타난 결과와 실험기구의 성능을 고려하여 설정하였다. 회전속도는 1,200, 1,500, 1,800rpm으로 선정하였고, 연마 핀의 무게는 1.0, 1.5, 2.0kg으로 조절하여 실험하였다. 연마 핀의 직경은 0.3, 0.5, 0.7mm로 선정하였고 가공 시간은 5, 10, 15분으로 설정하여 실험을 수행하였다. Table 4.7은 본 실험에 사용된 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 나타낸 것으로 총 9번의 실험을 실시하였다.

Table 4.6 Experimental factors and levels

Factors	Levels		
	1	2	3
Rotational speed(rpm), A	1,200	1,500	1,800
Pin weight(kg), B	1.0	1.5	2.0
Diameter of a pin(mm), C	0.3	0.5	0.7
Working time(min), D	5	10	15

Table 4.7 Taguchi's $L_9(3^4)$ orthogonal array table

Exp. no.	Level			
	A	B	C	D
1	1,200	1.0	0.3	5
2	1,200	1.5	0.5	10
3	1,200	2.0	0.7	15
4	1,500	1.0	0.5	15
5	1,500	1.5	0.7	5
6	1,500	2.0	0.3	10
7	1,800	1.0	0.7	10
8	1,800	1.5	0.3	15
9	1,800	2.0	0.5	5

4.3.2 표면거칠기 향상 분석 결과

본 연구에서 사용된 공작물의 초기 표면거칠기가 모두 동일하지 않기 때문에 표면거칠기 향상 정도 평가를 위하여 결과값은 가공 전과 가공 후의 표면거칠기 값의 비로 평가하였고 이를 식 (4.1)과 같이 표면거칠기 계수, ΔR_a ,로 정의하였다. 산출된 결과값을 바탕으로 신호 대 잡음비(S/N ratio, η)를 이용하여 표면거칠기 향상 정도를 평가하였다.

$$\Delta R_a = 1 - \frac{R_i - R_f}{R_i} \quad (4.1)$$

여기서 R_i 는 초기 표면거칠기 값이며, R_f 는 자기연마 공정 후의 표면거칠기 값이다.

식 (4.1)에 따라 ΔR_a 가 1보다 작으면 가공 전 대비 가공 후의 표면거칠기가 향상됨을 의미하고 반대로 1보다 크면 가공된 표면이 거칠어짐을 의미한다. 따라서 ΔR_a 를 통해 전자연마 공정의 가공 효율 정도를 판단할 수 있다.

S/N비는 표면거칠기 향상에 영향을 주는 인자와 수준의 조합을 파악할 수 있는 요소로 실험계획법에서 사용되는 S/N비는 특성에 따라 다음 식 (4.2), (4.3), (4.4)와 같이 망대특성, 망소특성, 망목특성으로 분류할 수 있다^[98-100].

(1) 망대특성 : 수명, 수율 등과 같이 특성치가 클수록 좋은 경우

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.2)$$

(2) 망소특성 : 마모, 불량률 등과 같이 특성치가 작을수록 좋은 경우

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.3)$$

(3) 망목특성 : 무게, 길이 등과 같이 목표치가 주어졌고 특성치가 목표치에 가까울수록 좋은 경우

$$\eta = -10 \log \left(\frac{\bar{y}}{\sigma} \right) \quad (4.4)$$

여기서 y_i 는 실험에서 얻어진 값을 의미하고 $\bar{y}$ 는 y_i 의 평균을 의미한다. σ 는 표준편차 n 은 실험횟수를 나타낸다.

본 연구에서는 ΔR_u 가 작을수록 균일한 표면을 얻을 수 있으므로 망소특성을 이용하여 표면거칠기 향상 정도를 평가하였다. 즉, ΔR_u 가 1보다 작을 경우 S/N비는 양의 값으로 특정 인자 및 수준의 조합에서 표면거칠기 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 반면에 ΔR_u 가 1보다 클 경우 S/N비가 음의 값을 가지게 되고 이를 통해 표면거칠기 향상을 저해하는 조건을 파악할 수 있다.

선정된 인자 및 조건들이 표면거칠기 향상에 얼마나 영향을 미치는지 판단하기 위해서 Table 4.7과 같이 다구찌 직교 배열표에 따라 실험을 수행하였다. Table 4.8은 전자연마 공정 수행 전과 후에 측정된 표면거칠기 값과 이로부터 산출된 S/N비를 나타낸 것이다. Fig. 4.6은 ΔR_a 와 S/N비의 상관관계를 도식화 한 것으로 ΔR_a 가 작을수록 S/N비가 증가함을 볼 수 있었다.

본 연구에서는 망소특성을 적용하여 표면거칠기 향상 정도를 평가하므로 가장 높은 양의 값을 가지는 4번 실험이 표면 평탄화에 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있었다. 반면에 3번 실험과 7번 실험에서 S/N비가 음의 값을 취함을 알 수 있는데, 이는 해당 실험 조건에서의 인자와 수준의 조합이 표면가공을 저해하는 것으로 판단 할 수 있다.

산출된 S/N비를 이용하여 서로 다른 수준에서의 인자가 특성치들에 미치는 영향력, 인자별 특성치에 대한 영향력 차이와 각 인자의 기여율을 Table 4.9와 같이 나타내었다. 분석 결과, 전자연마 공정에서 표면거칠기 향상에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 인자 A인 자기 원판 디스크의 회전속도와 인자 C인 핀의 직경으로 각 인자의 기여율은 39%로 비슷하게 가공 효율에 기여함을 알 수 있었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 회전속도로 인한 자기에너지의 변화는 연마 핀의 공전속도와 연관되어 핀의 운동에너지를 향상시키고, 연마 핀의 직경 변화로 인한 체적의 변화는 핀에 작용하는 힘과 우력 모멘트를 상승시켜 공작물의 표면이 평탄화됨을 알 수 있었다. 반면에 인자 B인 연마 핀의 무게의 기여율은 약 10%로 표면거칠기 향상에 대한 영향이 가장 적게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 4.7은 각 인자에 대해 주 효과를 분석한 것으로 본 연구에 적

용된 범위 내에서 최적조건을 찾을 수 있었다. 최적의 조건 조합은 S/N비가 크게 나타난 조합으로 A2B2C2D3이다. 즉 자기 원판 디스크의 회전 속도가 1,500rpm, 연마 핀의 무게가 1.5kg, 연마 핀의 직경이 0.5mm, 가공 시간이 15분일 때 가장 높은 효율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 도출된 최적 조건을 바탕으로 실험을 수행한 결과, 다구찌 직교배열법을 이용한 9번의 실험 결과보다 표면거칠기가 크게 향상됨을 알 수 있었다. Table 4.10는 실험에서 수행된 최적 결과와 S/N비 조합으로 도출된 최적 결과를 비교한 것이다. 비교 결과 S/N비로 주 효과도를 분석하여 도출된 최적 조건이 실험결과 대비 약 11% 정도 표면가공 효율이 향상되었다.

Table 4.11은 각 인자들이 특성치에 미치는 영향들을 평가하기 위한 분산분석표이다. 여기서 SS는 각 인자별 S/N비의 제곱합이며, DOF는 각 인자별 자유도, V는 제곱평균, F_0 는 제곱평균비, E는 오차항을 나타낸다. 본 연구에서는 가장 작은 영향력을 보이는 인자 B를 풀링하였다. 분산분석 및 F-검증을 통하여 표면거칠기 향상에 인자 A가 90%의 유의 수준을 만족하고 인자 C가 95%의 유의수준을 만족함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 전자연마 공정을 이용한 U채널의 공작물의 표면거칠기 향상에 있어서 자기 원판 디스크의 회전속도, 연마 핀의 직경이 영향이 있을 것으로 판단된다.

Table 4.8 Experimental results and calculated S/N ratio

Exp. no.	Surface roughness(μm)		S/N ratio
	Before	After	
1	0.975	0.914	0.561
2	0.893	0.771	1.275
3	0.885	1.043	-1.425
4	1.304	0.792	4.334
5	1.265	1.103	1.194
6	1.656	1.149	3.179
7	0.912	0.965	-0.493
8	1.358	0.928	3.309
9	0.895	0.716	1.939

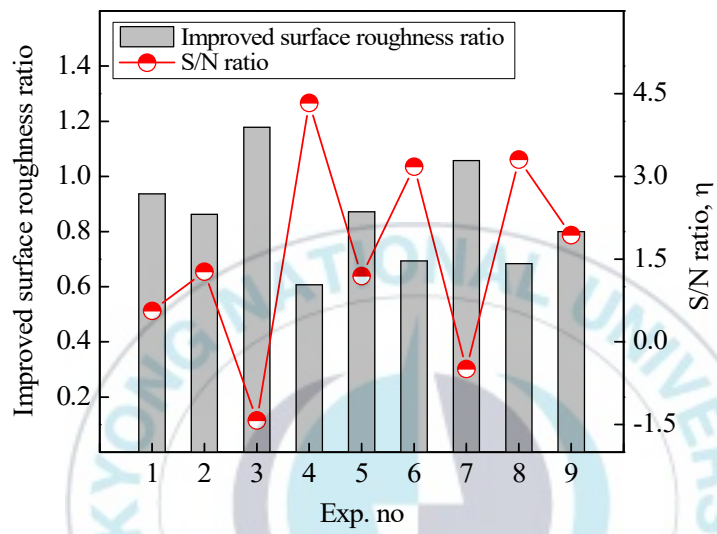


Fig. 4.6 Improved surface roughness ratio(ΔR_a) and S/N ratio

Table 4.9 Experimental results of S/N ratio for each factor

		Levels			Difference	Total	Percentage (%)
		1	2	3			
ΔR_a	A	0.137	2.902	1.585	2.765	7.058	39.17
	B	1.467	1.926	1.231	0.695		9.85
	C	2.350	2.516	-0.241	2.757		39.06
	D	1.231	1.320	2.073	0.841		11.92

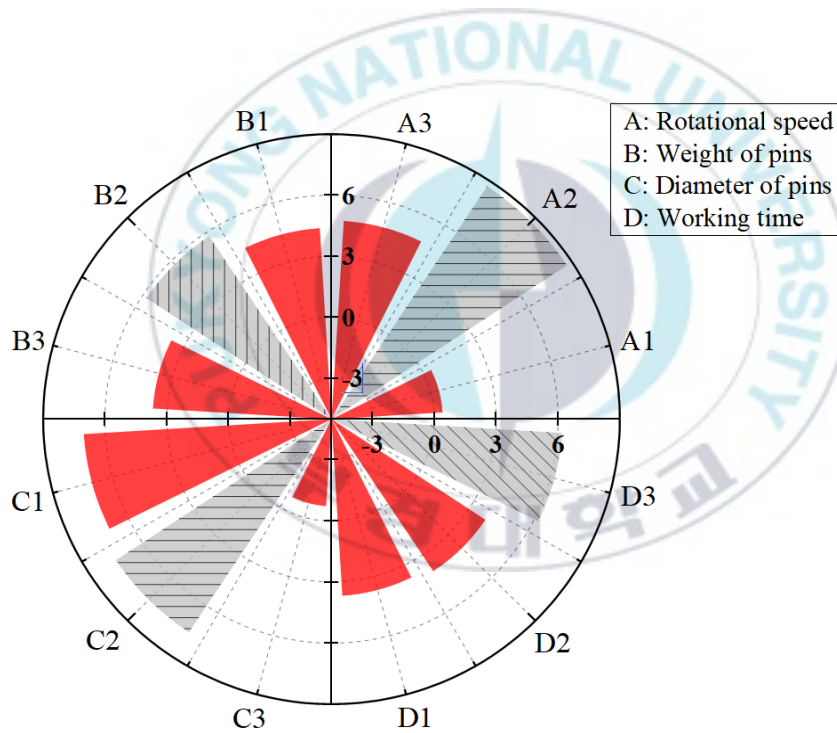


Fig. 4.7 Main effect of process factors on surface roughness

Table 4.10 Results of best and optimal configuration

Conditions	Surface roughness(μm)		Improved (%)
	Before	After	
Exp. no. 4	1.304	0.792	39.26
Optimum	1.273	0.635	50.12

Table 4.11 Results of ANOVA for surface roughness

	SS	DOF	V	F ₀
A	11.476	2	5.738	15.295
B	(0.750)	(2)	(0.375)	
C	14.342	2	7.171	19.115
D	1.282	2	0.641	1.709
E	0.750	2	0.375	
Total	27.850	8		

4.3.3 디버링 효과 분석 결과

본 연구는 비철금속인 Al6061에 마이크로 밀링가공으로 U채널을 가공할 때 표면 상부에 발생된 버를 효과적으로 제거하기 위하여 전자연마 공정을 실시하였다. 표면거칠기와 동일하게 발생된 버의 높이는 모두 동일하지 않으므로 버 제거 정도를 평가하기 위하여 식 (4.5)와 같이 버 제거율, ΔBR ,을 정의하여 가공 전과 가공 후 버 높이 값의 비를 계산하였다. 또한 공정 인자들이 디버링에 미치는 영향을 S/N비를 이용하여 평가하였다.

$$\Delta BR = 1 - \frac{B_i - B_f}{B_i} \quad (4.5)$$

여기서 B_i 는 초기 표면거칠기 값이며, B_f 는 자기연마 공정 후의 표면거칠기 값이다. 식 (4.5)에 따라 ΔBR 가 작을수록 버가 효과적으로 제거되었음을 의미하므로 망소특성을 이용하여 디버링 정도를 평가하였다.

선정된 인자 및 조건들이 버 제거율 향상에 미치는 영향력을 확인하기 위하여 실험계획법의 실험 절차에 따라 실험을 실시한 결과, Table 4.12와 같이 가공 수행 전과 후에 측정된 버의 높이와 S/N비를 산출할 수 있었다. Fig. 4.8은 ΔBR 과 S/N비의 상관관계를 도식화 한 것으로 4.3.2장에서 기술한 바와 같이 망소특성에서 ΔBR 가 작고 S/N비가 클수록 버 제거율 향상에 긍정적인 영향을 미치는 반면 ΔBR 가 크고 S/N비가 작을수록 버 제거 효율이 감소하여 형상 오차가 증대됨을 확인할 수 있었다. 분석 결과, 가장 높은 S/N 값을 가지는 8번 실

험이 디버링에 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있었다.

서로 다른 수준을 가지는 인자들이 특성치들에 미치는 영향력과 기여율을 Table 4.13에 나타내었다. 분석 결과, 전자연마 공정에서 버 제거 향상에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 인자 B인 핀의 무게로 기여율은 약 37%이다. 이는 동일 면적 내에서 공작물의 불필요한 부분을 제거하는 연마입자 수가 증가함에 따라 가공 효율이 증대되는 것으로 판단 할 수 있었다. 반면에 인자 D인 가공 시간에 대한 기여율은 약 7%로 다른 공정 인자 대비 디버링 효과가 저감됨을 알 수 있었다.

다구찌 실험계획법은 모든 인자의 조합을 고려하는 것이 아니므로 디버링에 적합한 최적 조건을 찾기 위하여 각 인자 및 수준에 대한 S/N비를 이용하여 주효과도를 분석하였다. 분석 결과는 Fig. 4.9에 도식화하였으며 디버링 향상에 영향을 미치는 최적의 조건 조합은 A3B2C3D3이다. 즉 회전속도가 1,800rpm, 연마 핀의 무게가 1.5kg, 연마 핀의 직경이 0.7mm, 가공 시간이 15분일 때 가장 높은 버 제거율을 나타내었다. 도출된 최적 결과를 바탕으로 실험을 수행한 결과, 다구찌 직교배열법을 이용한 9번의 실험 결과 대비 버 제거 효율이 향상됨을 알 수 있었다. Table 4.14와 Fig. 4.10은 실험에서 수행된 최적 결과와 S/N비 조합으로 도출된 최적 결과를 비교한 것이다.

Table 4.15는 각 인자들이 특성치에 미치는 영향들을 평가하기 위한 분산분석표이다. 본 연구에서는 가장 작은 영향력을 보이는 인자 D를 풀링하였다. 분산분석 및 F-검증을 통하여 디버링 효과에 인자 A가 90%의 유의수준을 만족하고 인자 B와 인자 C가 95%의 유의수준을 만족함을 알 수 있었다.

본 연구에서 도출된 디버링 효율에 대한 최적 조건은 표면거칠기 향상에 대한 최적 조건과 대비 회전속도와 연마 핀의 직경이 달라진 것을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 회전속도와 연마 핀의 직경이 클수록 연마 핀에 작용하는 힘과 우력 모멘트가 커짐으로써 버를 제거하는 효과가 증대하는 것으로 볼 수 있었다. 반면에 이러한 조건에서는 표면을 타격하는 힘이 증대되기 때문에 표면거칠기의 향상에는 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 따라서 본 공정을 통해 제시된 두 효과를 모두 만족시키기 위한 조건을 회색 관계 분석법을 통하여 도출하고자 한다.



Table 4.12 Experimental results and calculated S/N ratio

Exp. no.	Burr height(mm)		S/N ratio
	Before	After	
1	0.036	0.007	-1.878
2	0.044	0.019	-4.910
3	0.033	0.005	-1.427
4	0.049	0.010	-1.983
5	0.049	0.017	-3.701
6	0.027	0.001	-0.328
7	0.026	0.004	-1.451
8	0.031	0.004	-1.200
9	0.051	0.025	-5.852

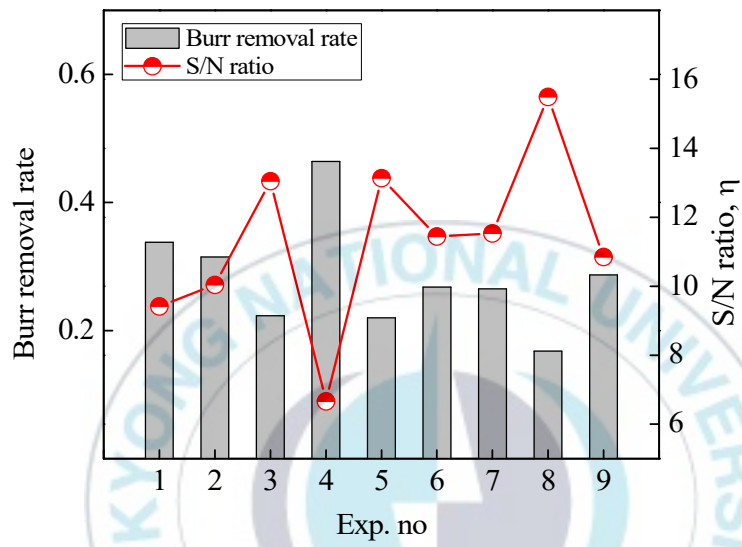


Fig. 4.8 Burr removal rate(ΔBR) and S/N ratio

Table 4.13 Experimental results of S/N ratio for each factor

		Levels			Difference	Total	Percentage (%)
		1	2	3			
ΔBR	A	10.833	10.417	12.627	6.631	30.031	22.08
	B	9.204	12.889	11.783	11.056		36.81
	C	12.117	9.185	12.574	10.165		33.85
	E	11.136	11.007	11.733	2.179		7.26

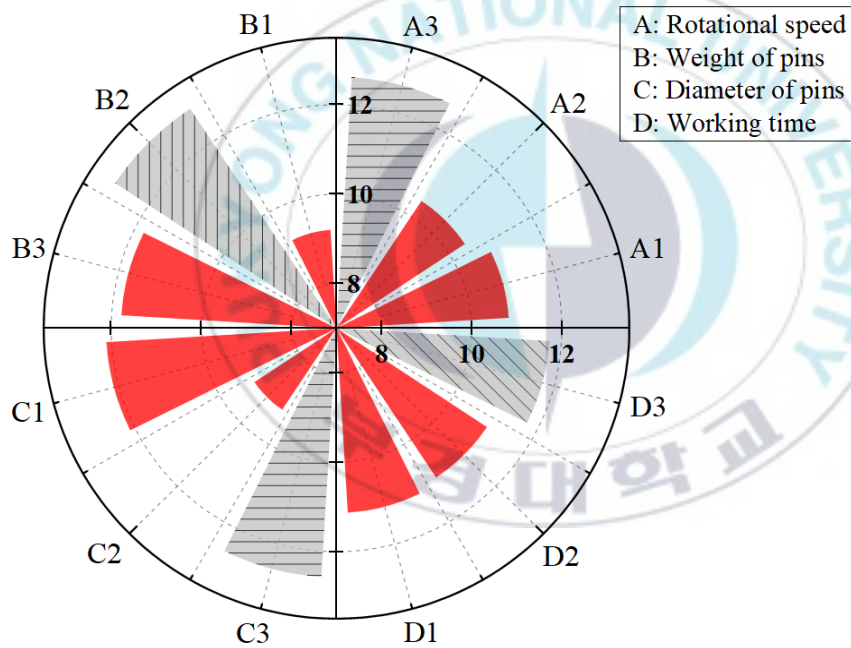


Fig. 4.9 Main effect of process factors on burr removal rate

Table 4.14 Results of best and optimal configuration

Conditions	Burr height(mm)		Improved (%)
	Before	After	
Exp. no. 8	0.0559	0.0094	83.18
Optimum	0.0580	0.0093	83.96

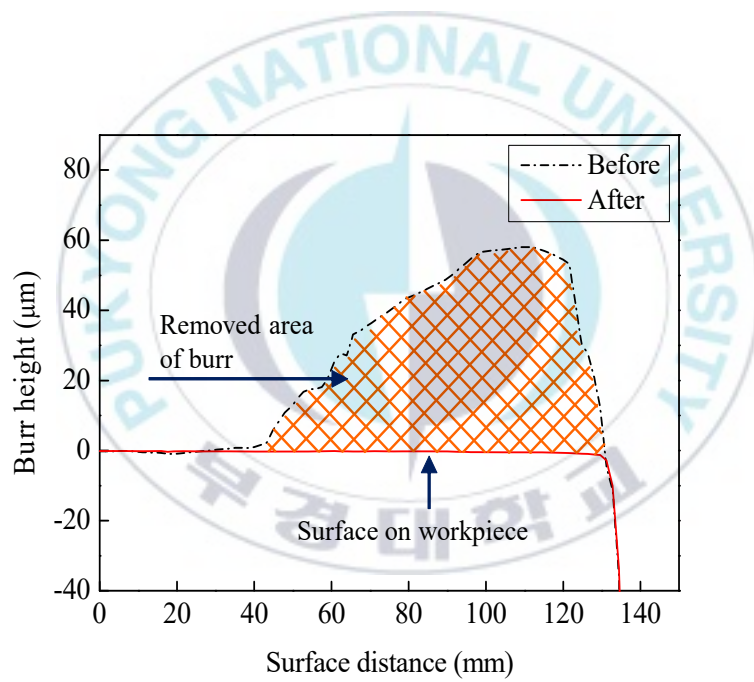


Fig. 4.10 Burr removal area in optimal condition

Table 4.15 Results of ANOVA for burr removal rate

	SS	DOF	V	F ₀
A	8.278	2	4.139	9.179
B	21.456	2	10.728	23.792
C	20.287	2	10.144	22.497
D	(0.902)	(2)	(0.451)	
E	0.902	2	0.451	
Total	19.684	8		

4.4 회색관계 분석을 이용한 다목적 최적화

4.4.1 데이터 전처리 과정 및 편차 결과

전자연마 공정을 활용한 Al6061의 표면거칠기 향상과 버 제거에 따른 형상 오차를 줄이기 위하여 인자와 그 수준에 따른 실험을 다구찌 직교배열법에 따라 실험을 수행하였다. 실험 결과를 바탕으로 두 조건 모두 만족시킬 수 있는 공정의 최적 조건을 도출하기 위하여 GRA를 적용하였다.

실험을 통해 산출된 ΔR_a 와 ΔBR 를 0에서 1사이 값으로 정량화하기 위하여 데이터 전처리 과정을 거쳤다. 본 연구에서 얻어지는 표면거칠기 향상 계수와 버 제거율은 값이 작을수록 가공 효율이 향상되므로 식 (2.4)의 망소특성에 따라 회색관계형상계수를 계산하였고 결과는 Table 4.16에 나타낸 바와 같다.

목표값에 근접한 해를 찾기 위해 데이터 전처리 과정을 통해 변환된 S/N비와 이상 값 1의 편차를 아래와 같이 계산하였다.

(1) ΔR_a 일 경우

$$\begin{aligned}\Delta_{01}(1) &= |x_0^*(k) - x_1^*(k)| = |1 - 0.4217| = 0.5783 \\ \Delta_{02}(1) &= |x_0^*(k) - x_2^*(k)| = |1 - 0.5513| = 0.4487 \\ &\vdots \\ \Delta_{09}(1) &= |x_0^*(k) - x_9^*(k)| = |1 - 0.6624| = 0.3376\end{aligned}\tag{4.6}$$

(2) $\triangle BR$ 일 경우

$$\triangle_{01}(2) = |x_0^*(k) - x_1^*(k)| = |1 - 0.6123| = 0.3877$$

$$\triangle_{02}(2) = |x_0^*(k) - x_2^*(k)| = |1 - 0.5513| = 0.5568$$

$\vdots$

$$\triangle_{09}(2) = |x_0^*(k) - x_9^*(k)| = |1 - 0.3376| = 0.3253 \quad (4.7)$$



Table 4.16 Results of grey relational generating and deviation sequences

Exp. no.	Grey relational generating		Deviation sequence	
	ΔR_a	ΔBR	$\Delta_{0i}(1)$	$\Delta_{0i}(2)$
1	0.4217	0.3877	0.5783	0.3877
2	0.5513	0.5568	0.4877	0.5568
3	0.0000	0.5851	1.0000	0.5851
4	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000
5	0.5371	0.9465	0.4629	0.9465
6	0.8488	0.3392	0.1512	0.3392
7	0.2099	0.6915	0.7901	0.6915
8	0.8669	0.0000	0.1331	0.0000
9	0.6624	0.3253	0.3376	0.3253

4.4.2 회색관계 계수와 회색관계 등급 평가 및 분석

식 (4.6)과 식 (4.7)를 통해 계산된 편차를 바탕으로 식 (2.6)을 이용하여 회색관계 계수를 계산하였다. 회색관계계수는 실제와 이상 값의 관계를 나타내는 것으로 산출된 값이 이상 목표치인 1에 가까울수록 최적 조건임을 의미하고 본 연구의 회색관계계수는 Table 4.17과 같다. 표면거칠기에 변화에 민감한 영향을 미치는 조건은 회색관계계수가 1.000인 4번 실험으로 자기 원판 디스크의 회전속도가 1,500rpm, 연마 핀의 무게가 2kg, 연마 핀의 직경이 0.5mm, 가공 시간이 15분일 때임을 확인 할 수 있었고 이는 4.3.2장에 기술된 다구찌 실험계획법과 동일한 결과임을 알 수 있었다. 반면에 9개의 조건 중 가장 작은 값인 0.3333을 가지는 3번 실험이 표면거칠기 향상에 가장 적은 효과를 보이는 것으로 나타났다. 디버링 효과 또한 회색관계계수가 1.000으로 가장 큰 8번 실험에서 불필요한 버가 효율적으로 제거되었다. 이는 4.3.3장에서 다구찌 실험계획법을 통해 도출된 결과와 동일한 것으로 회전속도가 1,800rpm, 연마 핀의 무게가 1.5kg, 연마 핀의 직경이 $\Phi 0.3$, 가공 시간이 15분일 때 좋은 표면을 얻을 수 있음을 확인하였다. 반면에 가장 낮은 값은 0.3333으로 4번 실험의 조건에 해당됨을 확인하였다.

소재의 마무리 공정에서 가공 시간 절감 및 효율 향상을 위해 두 조건 모두를 동시에 만족할 수 있어야하므로 산출된 회색관계계수를 산술 평균으로 나타내는데 이를 회색관계등급이라 하고 본 연구에서 산출된 값은 Table 4.17에 나타내었다. 1에 가까운 값일수록 표면거칠기와 디버링 향상 정도가 우수한 것을 나타내므로 0.895가 산출된 8

번 실험일 때의 공정 인자 조합 A3B2C1D3임이 최적 조건임을 알 수 있었다.



Table 4.17 Grey relational coefficient and grade

Exp. no.	Grey relational coefficient		Grey relational grade	Orders
	ΔR_a	ΔBR		
1	0.4637	0.5633	0.513	5
2	0.5270	0.4731	0.500	6
3	0.3333	0.4608	0.397	9
4	1.0000*	0.3333	0.667	3
5	0.5192	0.3457	0.432	7
6	0.7678	0.5958	0.682	2
7	0.3876	0.4196	0.404	8
8	0.7898	1.0000*	0.895*	1
9	0.8970	0.6058	0.601	4

* Optimum conditions

4.4.3 최적화 설계 검증 및 평가

Table 4.18과 Fig. 4.11은 계산된 회색관계 등급에 대한 각 인자의 평균 영향력을 나타낸 것이다. 분석 결과, 가장 큰 영향을 미치는 공정 인자는 전체 기여도 중 약 43%를 차지하는 연마 핀의 직경이다. 이는 연마 핀의 직경이 커질수록 체적이 증대되고 표면을 타격하는 힘과 토크가 비례하여 증가함으로써 표면의 평탄도와 금속제거량에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 두 번째로 가공 효율에 영향을 주는 인자는 자기 원판 디스크의 회전속도이다. 회전속도의 변화로 원형 수조 내 자기장이 변화하게 되고 변화된 자성에너지가 연마 핀의 거동에 영향을 끼치게 된다.

이러한 현상은 공작물의 형상 오차를 줄이고 높은 품위의 표면을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 원형 수조와 자기 원판 디스크의 간극이 회전속도와 유사하게 가공 성능에 영향을 주는 인자로 나타났다. 간극이 좁을수록 자성체인 원형 수조 내 자속밀도가 증대되기 때문에 자기력의 세기가 향상된다. 이는 연마 핀의 운동에너지를 증가 시킴으로써 공정 효율을 상승시킨다. 한편, 가장 적은 영향력을 주는 인자는 연마 핀의 무게임을 확인할 수 있었다.

Table 4.18 Mean response table for grey relational grade

Exp. no.	Controllable parameters			
	A	B	C	D
1	0.4702	0.5279	0.6967*	0.5158
2	0.5936	0.6091*	0.5894	0.5285
3	0.6333*	0.5601	0.4110	0.6529*
Max-Min	0.1631	0.0812	0.2857	0.1371
Total	0.6671			
Contribution(%)	24.45	12.18	42.82	20.55

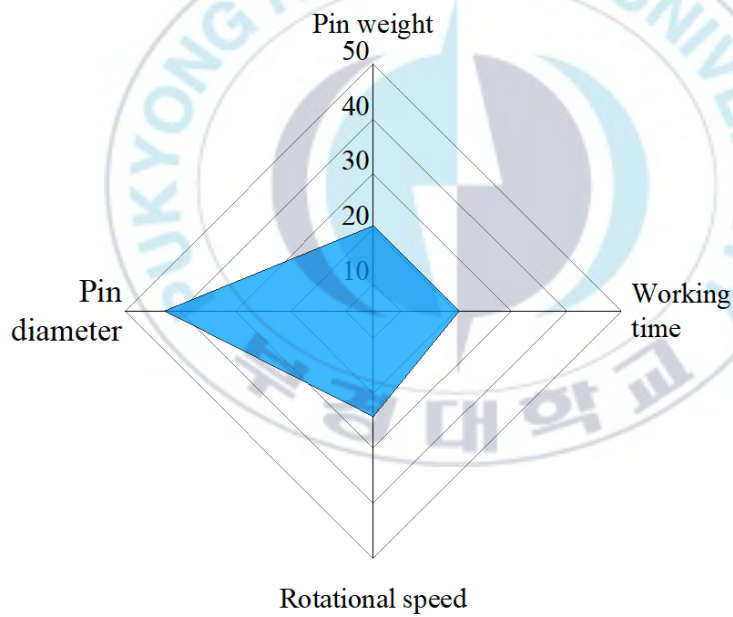


Fig. 4.11 Main effect of process factors on multiple requirements

5. 전자연마 가공의 적용 사례 연구

5.1 솔레노이드 밸브 부품 선정

본 연구에서는 MAF공정이 비자성체의 표면가공에 대해 가지는 문제점에 대해 극복하고 가공 효율을 향상시키기 위해 EMF공정을 제안하였다. EMF공정은 영구자석의 회전에 의해 발생하는 자기에너지의 변화와 발생된 자기에너지의 영향을 받은 연마 핀의 운동에너지에 의해 표면을 가공하는 방법으로 제품 형상의 변화없이 표면을 평탄화하고 동시에 버를 제거할 수 있는 가공방법이다. 따라서 고정도의 가공과 생산 효율의 향상이 가능할 것으로 판단된다.

EMF공정이 비자성체의 표면가공에 미치는 효과를 확인하기 위하여 Ansys workbench를 이용한 시뮬레이션 분석을 통해 인자 변화에 따른 공정 특성을 파악하였다. 또한 실험계획법을 이용하여 자유곡면을 가지는 비자성체 금속인 A16061의 마무리공정에 적용함으로써 EMF공정이 표면거칠기 및 버 제거율 향상에 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

이에 5장에서는 4장에서 도출된 EMF공정의 최적조건을 바탕으로 자동차 자동변속기의 솔레노이드 밸브 부품인 홀더의 표면가공을 수행함으로써 실제 산업현장에서 본 공정이 적용 가능한지 타당성에 대해 검토해보고자 한다.

최근 세계적으로 환경보호를 위하여 자동차의 연비 개선, 안정성 향상 및 배출 가스 저감이 요구되어지고 있다. 특히 자동차 부품 중 자동변속기는 클러치나 변속 레버의 조작 없이 엔진의 출력토크를 자

동차의 주행속도와 부하에 맞게 변화시켜 가속성능 및 연비를 향상시키는 장치이다. 또한 수동변속기와 다르게 변속 시 발생하는 변속충격을 완화함으로써 운전자의 승차감을 향상시킨다. 이러한 이유로 자동변속기에 대한 기술 개발이 활발히 추진되고 있다.

자동변속기는 토크컨버터, 동력제어장치, 유압제어장치, 전자제어장치로 구성되어 있으며 원리는 Fig. 5.1과 같다. 토크컨버터는 토크증배 기능을 수행하고, 동력제어장치는 엔진의 동력을 전달한다. 유압제어장치는 밸브블록으로 구성되어 있으며 내부에는 수개의 솔레노이드 밸브로 구성되어 있다. 솔레노이드 밸브는 전자제어장치의 출력신호를 입력받아 변속 및 클러치를 제어하는 역할을 수행한다. 또한 유체의 흐름을 이용하여 변속기 내부에 윤활작용을 담당하고 압력제어를 통하여 변속과정 중에 발생할 수 있는 충격을 완화시키는 장치이다.

[101]

자동변속기의 주요 구성요소는 유압제어장치에 의해 구동되거나 제어되어지므로 유압제어장치의 구성요소와 성능이 변속품질을 결정한다. 따라서 관련 시스템의 기술개발이 요구되어지고 있다.

솔레노이드 밸브는 유압제어장치를 구성하는 부품으로 유압의 흐름을 제어하기 위해 사용한다. Fig. 5.2와 Fig. 5.3은 솔레노이드 밸브의 구조를 도식화 한 것으로 크게 기계-유압 장치와 전자기적 장치 2부분으로 구성되어 있다. 기계-유압 장치는 홀더 파트, 요크 파트, 플런저 파트로 나눌 수 있으며 전자기적 장치는 코일, 전자기, 튜브 등으로 구성되어 있다.

솔레노이드 밸브는 제어전류에 비례하여 홀더 파트의 스프링의 위치를 변화시켜 유량의 흐름을 제어하는 장치로써 작동원리는 다음과 같

다. 전자기적 장치 내에 있는 코일에 전류를 흘리면 자기장이 형성되어 자성체인 전자석을 자화시킨다. 그러면 자성체 내부에 자속이 집중되어 자속밀도가 상승되고 주위의 자성체를 끌어당기는 자력이 발생하게 된다. 이러한 전자기적 성질을 이용하여 플런저 등을 움직여 유량의 흐름을 제어한다. 또한 적정유압 이상일 경우 피드백되는 유압으로 스톱을 밀어주어 일정한 압력을 유지시켜 준다.

홀더는 스톱을 감싸는 하우징 역할 뿐만 아니라 스톱의 왕복운동에 의해 시스템으로부터 공급받은 오일을 특정 압력으로 제어하여 동력전달장치로 보내거나 시스템으로 다시 보내는 유로의 기능을 수행한다. 따라서 본 연구에서는 유압제어장치의 유압성능 정밀도를 향상시키기 위하여, 밸브블록 내에서 유로를 형성해주는 홀더의 표면을 EMF를 이용하여 가공하고 공정의 효과를 입증하고자 한다.



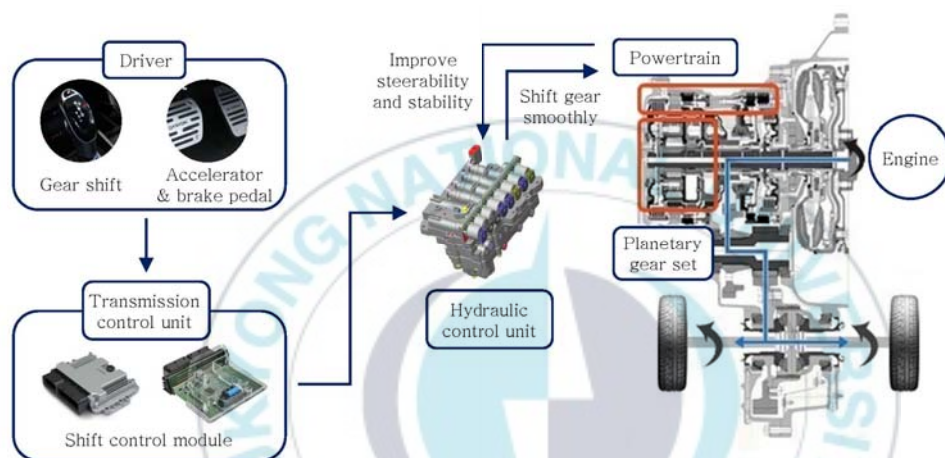


Fig. 5.1 Operating principle of auto transmission

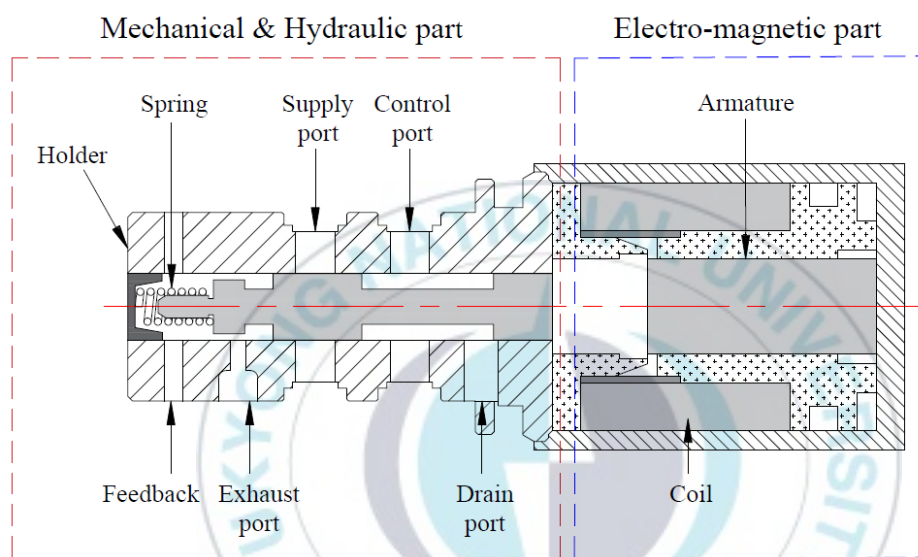


Fig. 5.2 Schematic structure of solenoid valve

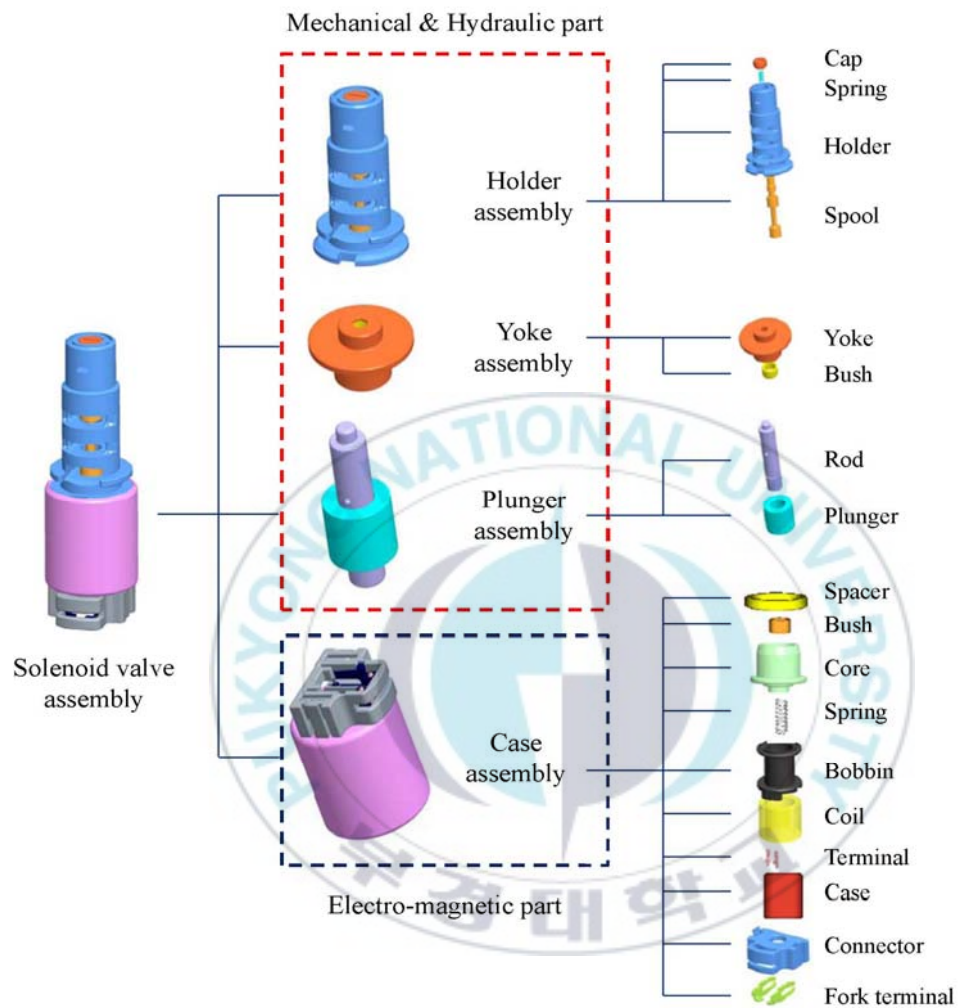


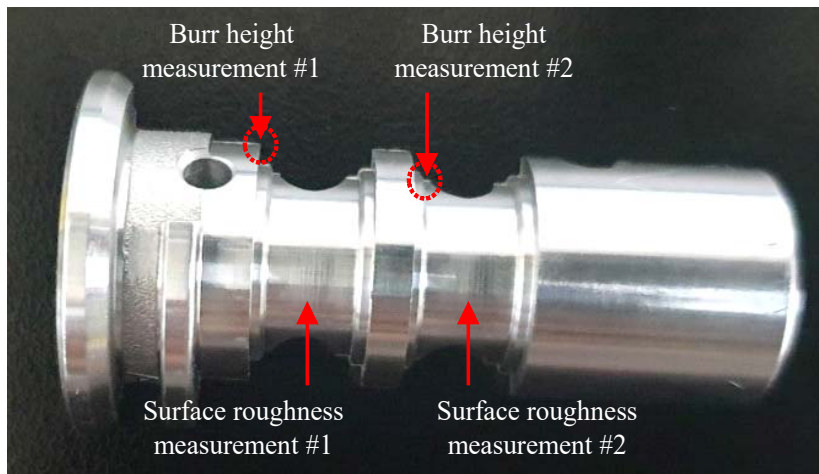
Fig. 5.3 Components of solenoid valve

5.2 실험 및 적용 결과

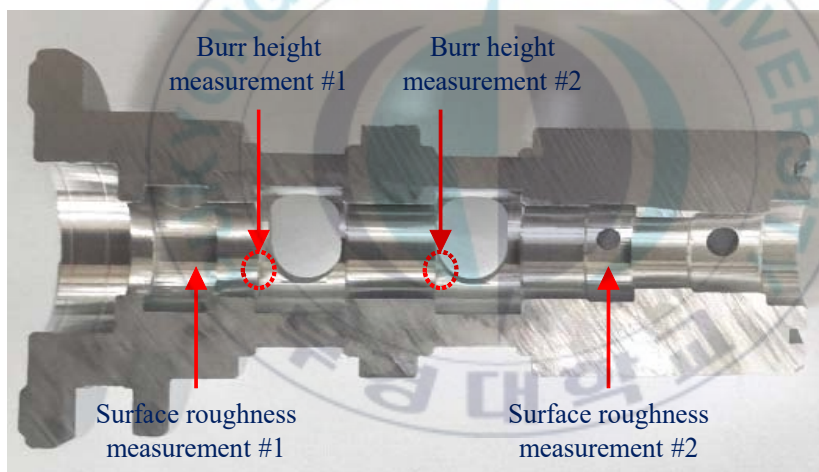
본 연구에서는 EMF 공정이 실제 산업 공정에 사용가능한지 타당성을 평가하기 위해 자동변속기 내에서 유로를 형성해주는 홀더의 표면 평탄도와 디버링 공정에 본 가공방법을 적용하였다. 실험조건은 회색관계법을 통해 도출된 조건인 회전속도 1,800rpm, 연마 핀의 무게 1.5kg, 연마 핀의 직경 0.3mm를 바탕으로 15분간 실험을 수행하였다.

실험 후 평가를 위한 측정 방법은 4.1장에 기술한 바와 같이 표면 조도계와 형상측정기를 사용하였고, 데이터 값의 신뢰성을 확보하기 위하여 동일구간을 3번 측정한 후 산술 평균으로 평가하였다. 실제 산업현장에서 본 부품의 표면거칠기는 R_a 으로 평가하며 요구스펙은 $0.2\mu\text{m}$ 이하이며 가공면 전체에서 버는 없을 것으로 규정되어 있다. 따라서 본 전자연마 실험에서는 평소 표면거칠기가 가장 나쁘고 버가 빈번히 발생하는 위치를 선정하여 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 5.4에 도시된 바와 같다.

실험 결과, 홀더 내·외측부분의 버는 EMF 공정 후 모두 제거되었으며 표면거칠기 값 또한 약 50% 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 EMF 공정이 자유곡면을 가지는 비자성체의 표면 가공에 대해 MAF를 대체할 수 있을 뿐만 아니라 실제 공정에 적용가능함을 확인할 수 있었다.



(a) External part of holder



(a) Internal part of holder

Fig. 5.4 Conducted holder of solenoid valve

Table 5.1 Results of external part in optimal condition

Conditions		Measurement	
		#1	#2
Surface roughness(μm)	Before	0.340	0.320
	After	0.180	0.190
ΔR_a		0.529	0.594
Burr height(mm)	Before	0.026	0.029
	After	0.000	0.000
ΔBR		0.000	0.000

Table 5.2 Results of internal part in optimal condition

Conditions		Measurement	
		#1	#2
Surface roughness(μm)	Before	0.381	0.340
	After	0.171	0.175
ΔR_a		0.447	0.515
Burr height(mm)	Before	0.026	0.029
	After	0.000	0.000
ΔBR		0.000	0.000

6. 결론

본 연구에서는 자유곡면을 가지는 비자성체 Al6061의 표면 품질을 향상시키고자 전자연마 공정을 제안하였다. 제안한 연마공정에서 자기에너지에 영향을 미치는 인자를 선정하고 시뮬레이션을 이용하여 인자 변화 및 극성 변화에 따른 자기장의 분포 및 세기를 분석하였다. 분석 결과를 토대로 연마기기를 구성하고 시편의 표면거칠기와 디버링 향상에 영향을 주는 공정 조건을 선정한 후 실험계획법에 따라 실험을 수행하였고 GRA를 활용하여 두 목적함수를 모두 만족시키는 최적 조건을 도출하였다. 제안한 전자연마 공정의 효과를 입증하고자 최적 조건을 바탕으로 자동변속기 솔레노이드 밸브의 부품을 가공하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 아래와 같다.

- (1) 전자연마 공정의 자기장 분포 특성을 규명하기 위하여 자기에너지 변화에 영향을 주는 공정인자를 선정하고 Ansys workbench를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 선정된 인자들은 자기 원판 디스크에 설치되는 영구자석의 형태, 개수, 위치 반경과 원형 수조와 자기 원판 디스크 사이의 간극으로 설정하였다. 유한요소해석 수행결과, 4개의 사각형태 영구자석이 회전 중심축으로부터 180mm인 곳에 설치되고 수조와 자기 원판 디스크의 간극이 135mm일 때 자기장의 분포가 전 영역에 걸쳐 고르게 분포되고, 최고 자속밀도가 70.8mT로 나타남을 확인할 수 있었다.

- (2) 영구자석의 극성변화에 따른 자기장의 분포 및 세기를 확인하고자 유한요소해석을 이용하여 자기에너지의 변화를 확인하였다. 그 결과, 동일한 극이 배열된 NNNN극과 NNSS극은 자기력선의 성질에 따라 같은 극에서 자속밀도가 중첩되어 감쇄됨으로서 자기장의 세기가 낮음을 확인할 수 있었다. 또한 자기장의 분포가 불균일하여 연마 효율이 감소할 것으로 기대되었다. 반면 서로 다른 극이 교차 배열된 NSNS극에서는 극의 인력 작용으로 인해 자기력이 증대되었고 자기장도 고르게 분포되어 대면적 표면가공이 가능함을 확인하였다.
- (3) 전자연마 공정에서 자속밀도를 최댓값으로 고정하고 실험을 수행한 결과, 연마 핀의 직경과 무게가 클수록 핀의 운동에너지 증가로 인해 표면거칠기 향상 정도가 증대됨을 알 수 있었다. 그러나 연마 핀의 직경과 무게가 각각 0.7mm와 2kg 이상이 되면 표면에 미치는 힘이 지나치게 증대되어 거친 표면이 얻어졌다. 또한 15분 이후의 가공은 표면거칠기에 더이상 영향을 미치지 않음을 확인하였다.
- (4) 표면거칠기 향상에 필요한 최적 조건은 자기 원판 디스크의 회전속도가 1,500rpm, 연마 핀의 무게가 1.5kg, 연마 핀의 직경이 0.5mm, 가공 시간이 15분일 때임을 확인하였다. 또한 표면거칠기 향상에 크게 영향을 미치는 인자는 자기 원판 디스크의 회전속도와 핀의 직경임을 알 수 있었다.

- (5) 버 제거 효율 향상에 가장 영향을 많이 미치는 인자들의 조건은 자기 원판 디스크의 회전속도가 1,800rpm, 연마 핀의 무게가 1.0kg, 연마 핀의 직경이 0.7mm, 가공 시간이 15분일 때임을 알 수 있었다. 또한 분산분석을 통해 디버링에 가장 영향을 많이 미치는 인자는 핀의 무게인 반면 가공 시간은 그 영향이 미미함을 확인하였다.
- (6) 회색관계 분석법을 이용하여 표면거칠기와 디버링 효과 향상 모두를 만족할 수 있는 최적 공정 인자는 자기 원판 디스크의 회전속도가 1,800rpm, 연마 핀의 무게가 1.5kg, 연마 핀의 직경이 0.3mm, 가공 시간이 15분일 때임을 확인하였다.
- (7) 전자연마 가공법의 효율성을 확인하고자 회색관계 분석법으로도출된 조건을 바탕으로 솔레노이드 밸브 홀더 표면가공을 수행하였다. 수행 결과, 산업현장에서 요구하는 R_a 0.2 μ m 이하, 버 제로 조건 모두를 충족함으로써 전자연마 가공의 우수성을 확인하였다.

References

1. F. Hashimoto, R. G. Chaudhar, and S. N. Melkote, "Characteristics and performance of surfaces created by various finishing method", *Procedia CIRP*, Vol. 45, pp. 1-6, 2016.
2. F. Hashimoto, H. Yamaguchi, P. Krajnik, K. Wegener, R. Caudhari, H. W. Hoffmeister, and F. Kuster, "Abrasive fine-finishing technology", *CIRP annals*, Vol. 65, No. 2, pp. 597-620, 2016.
3. P. Kala, and P. M. Pandey, "Comparison of finishing characteristics of two paramagnetic materials using double disc magnetic abrasive finishing", *Journal of manufacturing processes*, Vol. 17, pp. 63-77, 2015.
4. T. W. Kim and J. S. Kwak, "A study on deburring of magnesium alloy plate by magnetic abrasive polishing", *International journal of precision engineering and manufacturing*, Vol. 11, No. 2, pp. 189-194, 2010.
5. S. Jha, and V. K. Jain, "Design and development of the magnetorheological abrasive flow finishing(MRAFF) process", *International journal of machine tools and manufacture*, Vol. 44, No. 10, pp. 1019-1029, 2004.
6. S. Maan, G. Singh, and A. K. Singh, "Nano-surface-finishing of permanent mold punch using magnetorheological fluid-based finishing processes", *Materials and manufacturing processes* Vol. 32, No. 9, pp. 1004-1010, 2017.

7. R. Komanduri, D. A. Lucca, and T. Tani, "Technological advances in fine abrasive processes", CIRP annals, Vol. 46, No. 2, pp. 545-596, 1997.
8. Y. Ren, H. T. Yau, and Y. S. Lee, "Clean-up tool path generation by contraction tool method for machining complex polyhedral models.", Computers in industry, Vol. 54, No. 1, pp. 17-33, 2004.
9. L. Nagdeve, V. K. Jain, and J. Ramkumar, "Nanofinishing of freeform/ sculptured surfaces: state-of-the-art", Manufacturing review, Vol. 5, No. 6, pp. 1-20, 2018.
10. H. H. Moon, B. G. Park, C. H. Lee, and S. C. Kim, "A study on the surface roughness of ceramics according to ultrasonic polishing", Journal of the Korean society of manufacturing process engineers, Vol. 2, No. 1, pp. 15-25, 2003.
11. R. S. Mulik, and P. M. Pandey, "Mechanism of surface finishing in ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing process", Materials and manufacturing processes, Vol. 25, pp. 1418-1427, 2010.
12. T. K. Kwak, S. O. Kim, and J. S. Kwak, "Compound machining of milling and magnetic abrasive polishing for free form surface", Journal of the Korean society of manufacturing technology engineers, Vol. 19, No. 4, pp. 455-461, 2010.
13. E. S. Lee, S. G. Lee, S. H. Kim, and J. K. Won, "A study on the characteristics of a wafer-polishing process at various machining and oscillation speed", Journal of the Korean society of manufacturing process engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 1-6, 2012.

14. Y. C. Choi, A. Masahir, and N. Takeo, "A study on improving the efficient of magnetic abrasive polishing for die & mold surfaces", Journal of the Korean society of precision engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 102-107, 1996.
15. L. Nagdeve, V. K. Jain, and J. Ramkumar, "Preliminary investigations into nano-finishing of freeform surface (femoral component) using inverse replica fixture", International journal of advanced manufacturing technology, Vol. 100, No. 5-8, pp. 1081-1092, 2019.
16. L. Nagdeve, V. K. Jain, and J. Ramkumar, "Differential finishing of freeform surfaces(Knee joint) using R-MRAFF process & negative replica as a fixture", Machining science and technology, Vol. 22, No. 4, pp. 671-695, 2018.
17. S. Y. Jung, S. C. Yang, and Y. G Jung, "A study on the polishing moving type and the cutting characteristics of magnetic polished tool", Journal of the Korean society for precision engineering, Vol. 25, No. 2, pp. 28-34, 2008.
18. V. K. Jain, "Abrasive-based nano-finishing techniques: an overview", Machining science and technology, Vol. 12, pp. 257-294, 2008.
19. V. K. Jain, Nanofinishing science and technology: basic and advanced finishing and polishing processes, 1st Ed., CRC press, USA, 2016.
20. Y. Wang, and D. Hu, "Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing", International journal of machine tools

- and manufacture, Vol. 45, No. 1, pp. 43-49, 2005.
21. A. C. Wang and S. J. Lee, "Study the characteristics of magnetic finishing with gel abrasive", international journal of machine tools & manufacture, Vol. 49, pp. 1063-1069, 2009.
 22. S. L. Ko, Y. M. Baron, and J. I. Park, "Micro deburring for precision parts using magnetic abrasive finishing method", Journal of materials processing technology, Vol. 187-188, pp. 19-25, 2007.
 23. W. K. Park, and H. Choi, "The magnetic finishing characteristics of pipe inside polished by slurry circulation system", Journal of the Korean society of manufacturing process engineers, Vol. 3, No. 1, pp. 38-44, 2004.
 24. G. W. Chang, B. H. Yan, and R. T. Hsu, "Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives", International journal of machine tools and manufacture, Vol. 42, No. 5, pp. 575-583, 2002.
 25. S. H. Lee, B. H. Son, and J. S. Kwak "Study on effect of particle size of ferrous iron and polishing abrasive on surface quality improvement", Transaction of the Korean society of mechanical engineers-A, Vol. 38, No. 9, pp. 1013-1018, 2014.
 26. L. D. Yang, C. T. Lin, and H. M. Chow, "Optimization in MAF operations using Taguchi parameter design for AISI304 stainless steel", The international journal of advanced manufacturing technology, Vol. 42, pp. 595-605, 2009.

27. L. H. Li, S. D. Mun, Y. W. Kim, W. K. Park, and G. E. Yang, "A study on the characteristics of internal-face magnetic abrasive finishing of titanium pipe", Journal of the Korean society for precision engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 701-708, 2011.
28. V. K. Jain, P. Kumar, P. K. Behera, and S. C. Jayswal, "Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process", Wear, Vol. 250, pp. 384-390, 2001.
29. A. B. Khairy, "Aspects of surface and edge finish by magnetoabrasive particles", Journal of materials processing technology, Vol. 116, pp. 77-83, 2001.
30. G. C. Verma, P. Kala, and P. M. Pandey, "Experimental investigations into internal magnetic abrasive finishing of pipes", The international journal of advanced manufacturing technology Vol. 88, No. 5-8, pp. 1657-1668, 2017.
31. H. Yamaguchi and T. shinmura, "Study of an international magnetic abrasive finishing using a pole rotation system: Discussion of the characteristic abrasive behavior", Precision engineering Vol. 24, No. 3, pp. 237-244, 2000.
32. S. O. Kim and J. S. Kwak, "Study on performance improvement in magnetic abrasive polishing assisted by silicone gel medium", Transactions of Transaction of the Korean society of mechanical engineers-A, Vol. 34, No. 10, pp. 1499-1505, 2010.

33. T. S. Kwak and J. S. Kwak, "Magnetic abraasive polishing technology with ceramic particles", Journal of the Korean society for precision engineering, Vol. 30, No. 12, pp. 1253-1258, 2013.
34. T. C. Kanish, S. Narayanan, P. Kuppan, and A. S. Denis, "Investigations on the finishing forces in magnetic field assisted abrasive finishing of SS316L", Procedia engineering, Vol. 174, pp. 611-620, 2017.
35. H. N. Kim, S. K. Song, Y. K. Yun, H. W. Kim, B. S. Kim, H. J. Ahn, and J. W. Shim, "The effects of Be-Ferrite magnetic abrasive behavior on polishing characteristics", Journal of the Korean society of precision engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 311-317, 2003.
36. J. S. Kwak, "Enhanced magnetic abrasive polishing of non-ferrous metals utilizing a permanent magnet", International journal of machine tool manufacturing, Vol. 49, No. 7-8, pp. 613-618, 2009.
37. Y. Shaohui, and S. Takeo, "A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing", International journal of machine tool manufacturing, Vol. 44, No. 4, pp. 383-390, 2004.
38. S. O. Kim, S. H. Lee, and J. S. Kwak, "Development of prediction model and parameter optimization of second-generation magnetic abrasive polishing of magnesium alloy", Transaction of the Korean society of mechanical engineers-A, Vol. 35, No. 4, pp. 401-407, 2011.

39. H. S. Gang, T. H. Kim, and J. S. Kwak, "Control of polarity by magnetic array table in magnetic abrasive polishing process", Transaction of the Korean society of mechanical engineers-A, Vol. 34, No. 11, pp. 1643-1648, 2010.
40. T. W. Kim, D. M. Kang, and J. S. Kwak, "Application of magnetic abrasive polishing to composite materials", Journal of mechanical science and technology, Vol. 24, No. 5, pp. 1029-1034, 2010.
41. J. S. Kwak, "Mathematical model determination for improvement of surface roughness in magnetic-assisted abrasive polishing of nonferrous AISI316 material", Transaction of nonferrous metals society of china, Vol 22, pp. s845-s850, 2012.
42. H. Kansal, A. K. Singh, and V. Grover, "Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool", Precision engineering, Vol. 51, pp. 30-39, 2018.
43. M. Fox, K. Agrawal, T. Shinmura, and R. Komanduri, "Magnetic abrasive finishing of rollers", Annal CIRP, Vol, 43, No. 1, pp. 181-184, 1994.
44. V. K Jain, P Kumar, P. K. Behra, and S. C. jayswal, "Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process", Wear, Vol. 250, pp. 384-390, 2001.
45. D. K. Singh, V. K. Jain, and V. Raghuram, "On the performance of flexible magnetic abrasive brush", Machining science & technology, Vol. 9, No. 4, pp. 601-619, 2005.

46. D. K. Singh, V. K. Jain, and V. Raghuram, "Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process", International journal of advanced manufacturing technology, Vol. 30, No. 7-8, pp. 652-662, 2006.
47. H. Yamaguchi, and T. Shinmura, "Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system: Discussion of the characteristic abrasive behaviour", Precision engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 237-244, 2000.
48. S. O. Kim and J. S. Kwak, "Magnetic force improvement and parameter optimization for magnetic abrasive polishing of AZ31 magnesium alloy", Transactions of nonferrous metals society of China, Vol. 18, No. 1, pp. 369-373, 2008.
49. S. O. Kim, M. H. You, and J. S. Kwak, "Tool geometry optimization and magnetic abrasive polishing for non-ferrous material", Journal of Korean society of manufacturing engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 313-320, 2010.
50. V. K. Jain, D. K. Singh, and V. Raghuram, "Analysis of performance of pulsating flexible magnetic abrasive brush(P-Fmab)", Machining science & technology, Vol. 12, No. 1, pp. 53-76, 2008.
51. W. K. Park, T. W. Roh, and H. Choi, "The effect on vibratory magnetic pole by magnetic abrasive finishing", Journal of the Korean society of manufacturing process engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 7-12, 2005.

52. R. S. Mulik, and P. M. Pandey, "Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives", International journal of refractory metals and hard materials, Vol. 29, No. 1, pp. 68-77, 2011.
53. R. S. Mulik, and P. M. Pandey, "Experimental investigations and modeling of finishing force and torque in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing", Journal of manufacturing science & engineering, Vol. 134, No. 5, pp.1-12, 2012.
54. J. I. Park, S. L. Ko, and Y. M. Baron, "Effective deburring of micro burr using magnetic abrasive finishing", Journal of the Korean society of precision engineering, Vol. 22, No. 5, pp.7-13, 2005.
55. J. I. Park, S. L. Ko, Y. H. Hanh, and Y. M. Baron, "Development of effective deburring method using vibration table", Key engineering materials, Vol. 291, No. 1, pp. 259-264, 2005.
56. Y. Zhang, M. Yoshioka, S. I. Hira, and Z. Wang, "Study on magnetic barrel machine equipped with tree-dimensional arrangement of magnets", Key engineering materials, Vol. 329, No. 1. pp. 761-766, 2007.
57. Y. Zhang, M. Yoshioka, S. I. Hira, and Z. Wang, "Effect of magnetic strength of three-dimensionally arranged magnetic barrel machine on polishing characteristics", International journal of precision engineering and manufacturing, Vol. 9, No. 2. pp. 34-38, 2008.

58. S. O. Kim, M. H. You, and J. S. Kwak, "Tool-path optimization of magnetic abrasive polishing using heuristic algorithm", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 20, No. 2, pp. 174-179, 2011.
59. A. Y. Jiao, H. J. Quan, Z. Z. Li, and Y. H. Zou, "Study on improving the trajectory to elevate the surface quality of plane magnetic abrasive finishing" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, No. 9-12, pp. 1613-1623, 2015.
60. T. Mori, K. Hirota, and Y. Kawashima, "Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144, pp. 682-686, 2003.
61. T. H. Kim, A study on experimental assessment and optimization of EP-MAP hybrid machining based on CNT-Co, M.S Thesis, Pukyong National University, 2011.
62. S. M. Rahul, and P. M. Pandey, "Magnetic abrasive finishing of hardened AISI52100 steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 5-8, pp. 501-515, 2011.
63. M. Mosavat, and A. Rahimi, "Numerical-experimental study on polishing of silicon wafer using magnetic abrasive finishing process", *Wear*, Vol. 424-425, pp. 143-150, 2019.
64. P. Kala, P. M. Pandey, G. C. Verma, and V. Sharma, "Understanding flexible abrasive brush behavior of double disk magnetic abrasive finishing based on force signature", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 28, No. 3, pp. 442-448, 2017.

65. D. H. Jin, and J. S. Kwak, "Experimental verification of characteristics of magnetic abrasive polishing combined with ultrasonic vibration", Transaction of the Korean society of mechanical engineers-A, Vol. 39, No. 9, pp. 93-928, 2015.
66. Y. Shaohui and S. Takeo, "Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy", International of machining tools & manufacture, Vol. 44, No. 12-13, pp. 1297-1303, 2004.
67. C. G. Park, The deburring process of micro channel for fuel cell bipolar plates using EP-MAP hybrid process, M.S Thesis, Pukyong national university, 2013.
68. H. Yamaguchi, T. Shinmura, and M. Takenaga, "Development of a new precision internal machining process using an alternating magnetic field", Precision engineering, Vol. 27, No.1, pp. 51-58, 2003.
69. T. B. Jones, Electromechanics of particles, 1st Ed. Cambridge university press, cambridge, UK, 1995.
70. K. Nishimura, T. Namiki, T. Ikeno, Y. Yamamoto, and W. D. Hutchison, "Magnetic and transport properties of stainless steels at low temperature", Acta metallurgica slovaca, Vol. 23, No. 3, pp. 257-263, 2017.
71. A. Bezuglow and G. Comert, "Short-term freeway traffic parameter prediction: Application of grey system theory models", Expert systems with application, Vol. 62, pp. 284-292, 2016.

72. T. Y. Pai, K. Hanaki, H. H. Ho, and C. M. Hsieh, "Using grey system theory to evaluate transportation effects on air quality trends in Japan", *Transportation research part D*, Vol. 12, No. 3, pp. 158-166, 2007.
73. D. Pi, J. Liu and X. Qin, "A grey prediction approach to forecasting energy demand in China", *Energy sources, part A: recovery, utilization, and environmental effects*, Vol. 32, No. 16, pp. 1517-1528, 2010.
74. J. Deng, "Introduction to grey system theory", *The journal of grey system*, Vol. 1 No. 1, pp. 1-24, 1989.
75. D. Darvishi, and P. Babaei, "Grey prediction in linear programming problems", *International journal of applied operational research*, Vol. 9, No. 1, pp. 11-18, 2019.
76. I. K. Jung, D. M. Lee, S. B. Lee, and J. T. Lim, "Optimization of lace tube with gray theory and design of experiment", *The transactions of the Korean institute of electrical engineers*, Vol. 65, No. 6, pp. 1001-1006, 2016.
77. N. Slavek, D. Krmpotić, and D. Blažević, "Grey system theory approach to quality of intranet", *International journal of advanced research in electrical electronics and instrumentation engineering*, Vol. 4, No. 10, pp. 8223-8230, 2015.
78. L. Sifeng, F. Zigeng, Y. Yingjie, and F. Jeffrey, "General grey numbers and their operations", *Grey system: theory and application*, Vol. 2, No. 3, pp. 341-349, 2012.

79. N. Slavek, and A. Jović, "Application of grey system theory to software projects ranking", Journal for control, measurement, electronics, computing & communication, Vol. 53, No. 3, pp. 284-293, 2012.
80. Y. Kuo, T. Yang, and G. W. Huang, "The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems", Computer & industrial engineering, Vol. 55, pp 80-93, 2008.
81. S. B. Lee, and D. M. Lee, "An optimization for flow control butterfly valve using grey relational analysis", Journal of Korean society of coastal and ocean engineers, Vol. 26, No. 6, pp. 359-366, 2014.
82. J-W. K. Chan, and T-K. L. Tong, "Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: grey relational analysis approach", Materials & design, Vol. 28, No. 5, pp. 1539-1546, 2007.
83. N. Tosun, "Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis", The international journal of advanced manufacturing technology, Vol. 28, No. 5-6, pp. 450-455, 2006.
84. A. N. Haq, P. Marimuthu, and R. Jeyapaul, "Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method", The international journal of advanced manufacturing technology, Vol. 37, No. 3-4, pp. 250-255, 2008.

85. L. B. Abhang, and M. Hameedullah, "Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in turning by using grey relational analysis", The international journal of advanced manufacturing technology, Vol. 63, No. 1-4, pp. 13-24, 2012.
86. R. K. Pandey, and S. S. Panda, "Optimization of multiple quality characteristics in bone drilling using grey relational analysis", Journal of orthopedics, Vol. 12, No. 1, pp. 39-45, 2015.
87. S. Mondal, C. P. Paul, L. M. Kukreja, A. Bandyopadhyay, and P. K. Pal, "Application of Taguchi-based gray relational analysis for evaluating the optimal laser cladding parameters for AISI1040 steel plane surface", The international journal of advanced manufacturing technology, Vol. 66, No. 1-4, pp. 91-96, 2013.
88. C. J .Tzeng, Y. H. Lin, Y. K. Yang, and M. C. Jeng, "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and grey relational analysis", Journal of materials processing technology, Vol. 209, No.6, pp. 2753-2759, 2009.
89. Y. M. Chiang, and H. H. Hsieh, "The use of the Taguchi method with grey relational analysis to optimize the thin-film sputtering process with multiple quality characteristic in color filter manufacturing", Computers & industrial engineering, Vol. 56, No. 2, pp. 648-661, 2009.
90. S. K. Kim, S. C. Woo, W. I. Kim, S. K. Park, and K. H. Lee, "A study on the optimization of multiple injection strategy for a diesel engine using grey relational analysis and linear regression model",

- Journal of liquid atomization and spray systems-Korea, Vol. 20, No. 4, pp. 247-253, 2015.
91. B. Das, S. Roy, R. N. Rai, and S. C. Saha, "Application of grey fuzzy logic for the optimization of CNC milling parameters for Al-4.5%Cu-TiC MMCs with multi-performance characteristics", Engineering science and technology, and international journal, Vol. 19, No. 2, pp. 857-865, 2016.
92. C. Zhu, N. Li, D. Re, and J. Guan, "Uncertainty in indoor air quality and grey system method", Building and environment, Vol. 42, No. 4, pp. 1711-1717, 2007.
93. S. Ramesh, R. Viswanathan, and S. Ambika, "Measurement and optimization of surface roughness and tool wear via grey relational analysis, TOPSIS and RSA techniques", Measurement, Vol 78, pp. 63-72, 2016.
94. J. Y. Gwon, E. S. Lee, and W. T. Kwon, "Optimization of performance using taguchi method and grey relational analysis in micro-EDM using copper electrode", Journal of the Korean society for precision engineering, Vol. 35, No. 8, pp.737-743, 2018.
95. B. Sun, J. Jiang, F. Zheng, W. Zhao, B. Y. Liaw, H. Ruan, Z. Han, and W. Zhang, "Practical state of health estimation of power batteries based on Delphi method and grey relational grade analysis", Journal of power source, Vol. 282, pp. 146-157, 2015.
96. S. Tripathy, and D. K. Tripathy, "Multi-attribute optimization of machining process parameters in powder mixed electro-discharge

- machining using TOPSIS and grey relational analysis", Engineering science and technology, and international journal, Vol. 19, No. 1, pp. 62-70, 2016.
97. W. Zuo, E. Jiaqiang, X. Liu, Q. Peng, Y. Deng, and H. Zhu, "Orthogonal experimental design and fuzzy grey relational analysis for emitter efficiency of the micro-cylindrical combustor with a step", Applied thermal engineering, Vol. 103, pp. 945-951, 2016.
98. S. Wojciechowski, R. W. Maruda, G. M. Kroczyk, and P. Nieslony, "Application of signal to noise ratio and grey relational analysis to minimize forces and vibration during precise ball end milling", Precision engineering, Vol. 58, pp. 582-596, 2018.
99. J. H. Shin, and D. H. Choi, "CO₂ laser drilling processing of the cover glass using the Taguchi method", Journal of welding and joining, Vol. 37, No.3, pp. 199-205, 2019.
100. S. H. Park, Design of experiments, 2nd Ed., Minyoung Publishing Co., Republic of Korea, 2012.
101. X. Xu, X. Han, Y. Liu, Y. Liu, and Y. Liu, "Modeling and dynamic analysis on the direct operating solenoid valve for improving the performance of the shifting control system", Appl. Sci., Vol. 7, No. 12 pp. 1266, 2017.