

알루미늄 합금 6061에서 와이어 진동부가에 의한 와이어 컷 방전가공에 따른 표면 거칠기 특성 (Ⅲ)

류청원*, 최성대**,#

*한국폴리텍대학 달성캠퍼스 컴퓨터응용기계학과, **금오공과대학교 기계시스템공학과

Characteristics of Surface Roughness According to Wire Vibration and Wire-cut Electric Discharge Machining of Aluminum Alloy 6061 (Ⅲ)

Cheong-Won Ryu*, Seong-Dae Choi**,#

*Department of Computer Applied Mechanical, Dalseong Campus of Korea Polytechnic college,

**Department of Mechanical System Engineering, Kumoh Institute of Technology

(Received 30 August 2015; received in revised form 9 November 2015; accepted 10 November 2015)

ABSTRACT

Recently, high-efficiency machining in the production of high-value products with complex shapes has constantly been required along with the need for hybrid machining. In this study, in addition to wire-cut Electric Discharge Machining (EDM) and vibration, we present the possibility of a hybrid process by carrying out an experiment with aluminum alloy, and the hybrid process determines the nature of the surface. The selected experimental parameters are waveform, amplitude, peak current, and two-dimensional (2D) vibration. The experimental results give the guideline for selecting reasonable machining parameters. The surface roughness was improved about 20% with increases in the amplitude of the vibration.

Key Words : Aluminium Alloy 6061(알루미늄 합금 6061), Wire-cut E.D.M.(와이어 컷 방전가공), Vibration(진동), 2-dimensional(2D)(2차원), Surface Roughness(표면 거칠기)

1. 서 론

최근에 고부가가치 제품의 생산에 있어서 고능력 가공의 필요성이 끊임없이 요구되면서 이를 위한 복합 형상가공에 하이브리드 가공의 필요성이 대두하고 있다.

하이브리드 가공이란 다수의 가공공정을 복합화

하여 각각의 공정이 가공에 직접적으로 관여하고 일부 공정은 가공에 직접적인 영향을 미치며, 나머지는 가공을 촉진 시키는 역할을 하는 가공 공정을 말한다^[1]. 단일공정만으로 가공이 완성 된다면 가장 합리적이겠지만 각기 다른 특성과 장단점을 가지고 있으므로 이중 이상의 가공공정이 필요한 실정이다. 그러므로 하이브리드 가공은 단일 가공공정의 단점은 극복하고 장점은 유지, 보완하여 가공성능을 극대화할 수 있다^[2].

와이어 컷 방전의 하이브리드가공은 전기적 공정과 기계적 공정이 결합된 형태인데, 와이어 전극을

Corresponding Author : sdchoi@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7396, Fax: +82-54-478-7319

사용하는 방전과 동시에 압전소자에 의해 발생하는 진동을 이용하는 것이다. 따라서 궁극적으로는 방전시 발생하는 표면 거칠기를 실제 가공에서 진동을 부가함으로써 낮은 표면 거칠기를 얻고자 하는 것이 본 연구의 목표이다.

본 논문에서는 방전가공과 진동을 복합화하여 알루미늄 합금의 하이브리드 가공 실험을 실시하고 표면의 특성을 파악함으로써 하이브리드 가공의 가능성을 제시한다.

2. 와이어 방전의 진동특성

2.1 움직이는 와이어의 진동

속도 v 로 움직이는 와이어의 운동방정식은 일반적으로 축방향으로 움직이는 현(Axially moving string)으로 운동방정식을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[3-5].

$$\rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial t} - (T - \rho v^2) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = f(x, t) \quad (1)$$

여기서 $\omega(x, t)$ 는 와이어의 대한 변위이고, ρ 는 단위 길이당 질량, v 는 이동속도, T 는 장력이다. 경계조건은,

$$\omega(0, t) = \omega(L, t) = 0 \quad (2)$$

식 (1)을 고유치 문제로 전환하여 간략화 하면,

$$\rho \omega_{tt} + 2v \omega_{xt} - (T - \rho v^2) \omega_{xx} = 0 \quad (3)$$

다시, 현의 이동과의 진행속도($v_c = \sqrt{T/\rho}$)로 변환시키면, 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\omega_{tt} + 2v \omega_{xt} - (v_c^2 - v^2) \omega_{xx} = 0 \quad (4)$$

식 (4)에서 $\omega(x, t)$ 를 변수 분리법을 통해서 이 시스템의 고유진동수를 구하면, 다음과 같다.

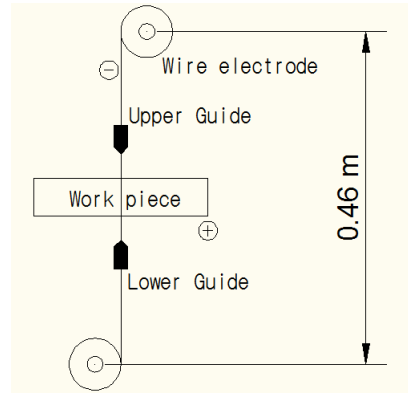


Fig. 1 Schematic diagram of fundamental frequency

$$\omega_n = \frac{n(v_c^2 - v^2)}{2v_c L} \quad (5)$$

식 (5)에서 보면, 움직이는 와이어의 고유진동수는 속도의 함수임을 알 수 있다. 따라서 와이어의 이동속도가 증가하게 되면 고유진동수가 제로가 되게 되는데, 이때의 속도를 임계속도(critical speed)라 하며 $v = v_c$ 가 되고, 이때 와이어는 좌굴(buckling) 불안정이 일어나게 된다. 위의 고유진동수식을 통해서 첫 번째 고유진동수를 구해보면 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\omega_1 = \frac{(119.56^2 - 0.04^2)}{2 \times 119.56 \times 0.46} = 129.96 \text{ Hz}$$

여기서 장력 T 는 $6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$, 와이어의 선밀도 ρ 는 $4.197 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$, 길이 L 은 0.46 m , 와이어의 이동속도 v 는 40 mm/s , 지름 b 는 0.25 mm 이다.

2.2 유체속에서 와이어의 진동

와이어 방전가공기의 많은 형태가 물과 같은 유체에 잠겨서 가공하기 때문에 이에 대한 효과를 알아보기 위해 유체속에서 와이어의 고유진동수 변화를 알아본다. 이상 유체 안에 속도 v 로 움직이는 와이어가 있을 때, 다음과 같은 단위 길이당 양력이 발생한다.

Table 1 Specifications of sweep function generator

Item	Specifications
Model	FG-1880B
Wide frequency range (Hz)	0.004 ~ 4M
Waveform	Sine, triangle, square, TTL pulse
Output(Amplitude) (Vp-p)	1 ~ 20
LOG/LIN. sweep mode	4-Decade/3-Decade
VCG input	1:10000

$$q_1 = -\pi m(b^2/4)(\omega_{tt} + 2v\omega_{xt} + v^2\omega_{xx}) \quad (6)$$

여기서 m 은 유체의 밀도, b 는 와이어의 폭이다. 식 (6)을 식 (3)에 대입하여 정리하면,

$$\rho^* \omega_{tt} + 2\rho^* v\omega_{xt} + \rho^* v^2\omega_{xx} - T\omega_{xx} = 0 \quad (7)$$

여기서,

$$\rho^* = \rho + \pi\rho b^2/4 = \rho + \rho_a \quad (8)$$

이다. 이 시스템의 고유진동수는 식 (5)의 ρ 를 식 (8)의 ρ^* 로 대체하여 얻을 수 있다.

$$\omega_n = \frac{n}{2L} \left(1 - \frac{(\rho + \rho_a)v^2}{T}\right) \sqrt{\frac{t}{(\rho + \rho_a)}} \quad (9)$$

여기서 와이어의 길이가 무한히 길다고 가정하면, 단위 길이당 양력을 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_2 = -\pi m(b^2/4)\omega_{tt} = \rho_a\omega_{tt} \quad (10)$$

앞에서와 같은 방법으로 식 (10)을 식 (3)에 대입하여 정리하면,

$$(\rho + \rho_a)\omega_{tt} + 2\rho v\omega_{xt} + \rho v^2\omega_{xx} - T\omega_{xx} = 0 \quad (11)$$

고유진동수는 식 (5)에서 구하는 것과 동일한 방법으로 $\omega(x, t)$ 를 변수 분리법을 통해서 구하면, 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_n = \frac{(1 - \rho v^2/T)}{\sqrt{(1 + \rho_a/\rho) - (\rho_a v^2/T)}} \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (12)$$

이와 같이 진공 상태와 이상 유체 안에서 일정속도로 움직이는 와이어의 고유진동수를 구해 보았다. 하지만 실제 와이어 방전가공기에 사용되는 와이어는 그 속도가 임계속도 보다 상당히 작고, 와이어의 직경도 0.2 ~ 0.3 mm로 상당히 작기 때문에 정지한 와이어의 고유진동수와 큰 차이가 없다.

3. 실험 장치 및 방법

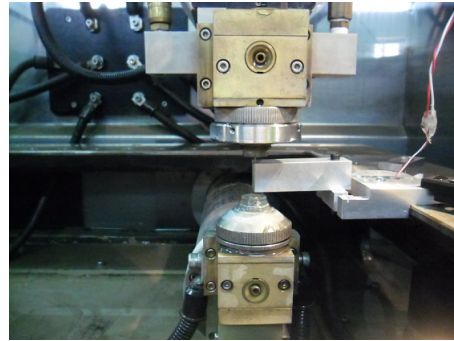


Fig. 2 Experimental setup for the hybrid WEDM

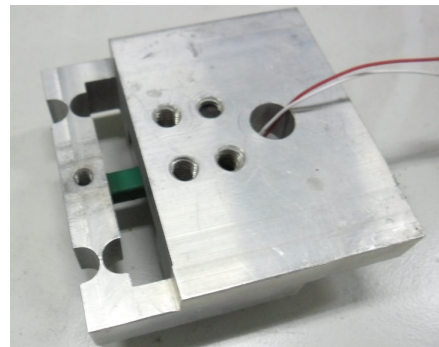


Fig. 3 The micro stage

3.1 실험 장치

본 실험은 알루미늄 합금 6061의 하이브리드 와이어 컷 방전에 따른 가공물의 표면을 고찰하기 위해 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 이 장치는 (주)진영정기의 JW-60B 모델 형식이며, 압전소자의 진동을 발생시키기 위해 Fig. 3과 같은 스테이지를 장치에 함수발생기(Sweep function generator)를 장착하여 진동을 발생하였다. 함수 발생기의 제원은 Table 1에 나타내었고, 실험에 사용된 와이어 전극은 지름 0.25 mm의 황동으로 이에 대한 물성치는 Table 2에 나타내었다.

본 실험에 사용된 알루미늄 합금 6061 시편의 크기는 20 × 20 × 5 mm로 48개의 시험편을 제작하였다. 시험편의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 3 및 4에 나타내었다.

3.2 실험 방법

Fig. 4는 와이어 컷 방전가공기에서 시험편의 방전

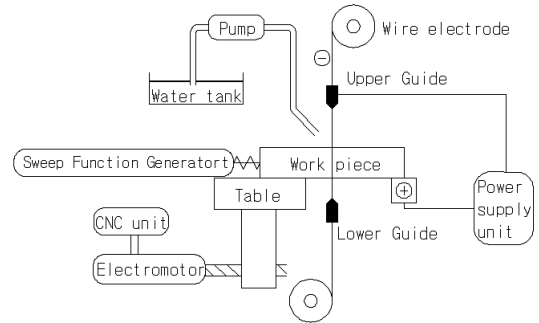


Fig. 4 Schematic diagram of the hybrid wire-cut E.D.M.

Table 5 Test conditions

Item	Specification
Direction	2-dimensional
Waveform	Square, Sine
Amplitude (V_{p-p})	7, 20
Peak current (A)	12, 14, 16
Frequency (Hz)	65, 130, 195, 260

과정을 나타낸 것으로 시험편을 바이스에 견고히 고정하였으며, 방전조건은 Table 5에 나타낸 바와 같이 무부하 전압을 13 V, 메인 펄스 휴지 시간을 7 μ s, 가공 속도는 2 mm/min, 가공방향은 2차원으로, 파형은 구형파, 사인파로, 진폭(파형교류전압)은 7, 20 V_{p-p} 으로, 사상 전류를 12에서 16 A까지 2 A 간격으로, 진동수는 65에서 260 Hz까지 65(고유진동수 0.5배) Hz간격에 따라 방전절삭실험을 시행하였다.

Table 6은 표면 거칠기 측정시스템을 나타내며 표면 거칠기 측정에 사용된 측정 장비는 Mitutoyo사 Surf-test SV-414 모델로서 표면 거칠기의 정확한 측정을 위해 수준기로 수평을 맞춘 후 컷 오프 값 0.8 mm, 기준길이는 컷 오프 값의 5배인 4 mm, 범위 값은 25 μ m로 설정하였으며 가공된 시험편을 알콜로 세척 후 측정 테이블 위에 올려놓고 절삭방향의 직각방향으로 이송장치를 작동하여 측정하였다.

Table 2 Mechanical properties of wire

Item	Specification
Diameter (mm)	0.25
Density (kg/m)	4.197×10^{-4}
Length (m)	0.46

Table 3 Chemical composition of work-piece Aluminium alloy 6061(wt.%)

Zn	Mg	Fe	Si	Cr	Cu	Al
0.062	1.002	0.5	0.704	0.198	0.215	remainder

Table 4 Mechanical composition of work-piece Aluminium alloy 6061

Item	Specification
Ultimate strength (N/mm^2)	305
Yield strength (N/mm^2)	245
Elongation (%)	14

Table 6 The specification of surface roughness measuring instrument

Item	Specifications
Model	Mitutoyo SURF-TEST SV-414
Limit indication (Ry, μm)	600
Cut off value (mm)	0.08 ~ 8
Basic range (mm)	0.25 ~ 8
Stylus force (N)	0.00392
Driving speed (mm/sec)	0.02 ~ 1.2
Stylus tip radius (μm)	5

Table 7 Specifications of measuring field emission scanning electron microscope

Item	Specifications
Model	JSM 7401F
Resolution (nm)	1.0, 1.5
Accelerating Voltage (kV)	0.1 ~ 30
Magnification	$\times 25 \sim 300,000$
Stage	Type I X=70 mm, Y=50 mm Type II X=110 mm, Y=80 mm Type III X=140 mm, Y=80 mm

증폭기 및 기록기로부터 최대높이(Ry), 10점 평균 거칠기(Rz), 산술 평균 거칠기(Ra)를 측정한다. 다음 그 중 산술 평균 거칠기 값을 선정하여 4회 측정된 평균값을 데이터로 사용하였다.

Table 7은 전계방출형 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscope)의 주요제원을 나타내고 있다. 시험편의 표면 형상은 1000배로 측정하여 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 표면 거칠기의 특성

Fig. 5는 와이어컷 방전에서 2차원(2D)으로 주축 이송속도를 2 mm/min, 와이어의 진동수를 0 Hz에서 260 Hz까지 65 Hz간격으로, 변화시켰을 때 최대 순간 전류(peak current)에 따른 질삭면에 대한 표면 거칠기 특성을 나타내고 있다.

Fig. 5 (a)의 구형파는 진동수가 0 Hz, 65 Hz, 130 Hz, 195 Hz, 260 Hz 순서로 260 Hz에서 표면 거칠기가 가장 낮게 나타내고 진동수가 0 Hz에서 260 Hz로 증가할수록 표면 거칠기가 감소하고 있다. 특히 전류가 12 A에서 16 A로 증가할수록 표면 거칠기가 증가하는 반면 낮은 진폭(7 V_{p-p})과 높은 진폭(20 V_{p-p})에서 높은 진폭(20 V_{p-p})일 때 낮은 표면 거칠기의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 5 (b)의 사인파는 진동수가 0 Hz, 65 Hz, 130 Hz, 195 Hz, 260 Hz 순서로 260 Hz에서 표면 거칠기가 가장 낮게 나타내고 진동수가 0 Hz에서 260 Hz로 증가할수록 표면 거칠기가 감소하고 있다. 특히 높은 진폭(20 V_{p-p})일 경우의 전류가 14 A에서 가장 높은 표면 거칠기를 보여주는 반면 낮은 진폭(7 V_{p-p})과 높은 진폭(20 V_{p-p})에서 높은 진폭(20 V_{p-p})일 때 낮은 표면 거칠기의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 5 (c)의 낮은 진폭(7 V_{p-p})에서 구형파에서 전류가 12 A에서 16 A로 증가할수록 표면 거칠기가 증가하는 반면 사인파에서 표면 거칠기가 감소하고 있다. 특히 16 A일 때 구형파 진동수의 표면 거칠기보다 사인파 진동수의 표면 거칠기가 가장 낮음을 알 수 있다.

Fig. 5 (d)의 높은 진폭(20 V_{p-p})에서 구형파에서 전류가 12 A에서 16 A로 증가할수록 표면 거칠기가 증가하는 반면 사인파에서 전류가 14 A에서 가장 높은 표면 거칠기를 나타냈다. 특히 16 A일 때 구형파 진동수의 표면 거칠기보다 사인파 진동수의 표면 거칠기가 가장 낮은 표면 거칠기를 보여주고 있다.

Fig. 5에서 2차원 진동수 0 Hz에서는 전압에 따른 구형파와 사인파는 낮은 진폭(7 V_{p-p})과 높은 진폭(20 V_{p-p})에서 표면 거칠기가 동일하게 나타내고 있는 것을 보여주고 있는데, 이것은 질삭양을 제외한 다른 질삭조건은 동일하기 때문에 동일한 표면

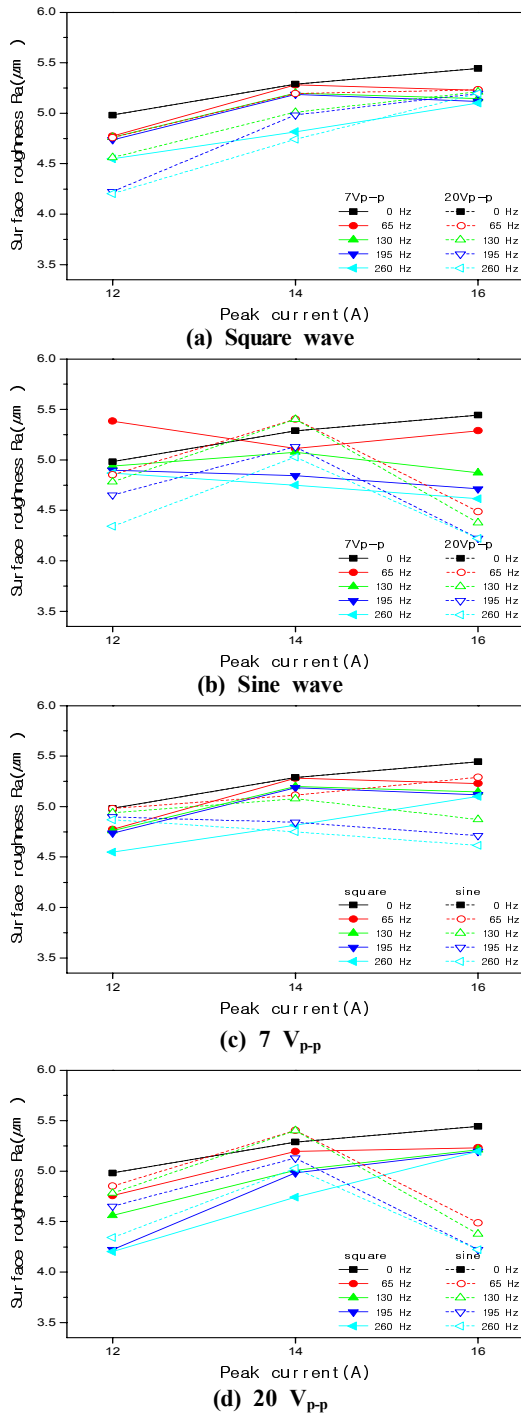


Fig. 5 Surface roughness according to peak current of 2-dimensional vibration

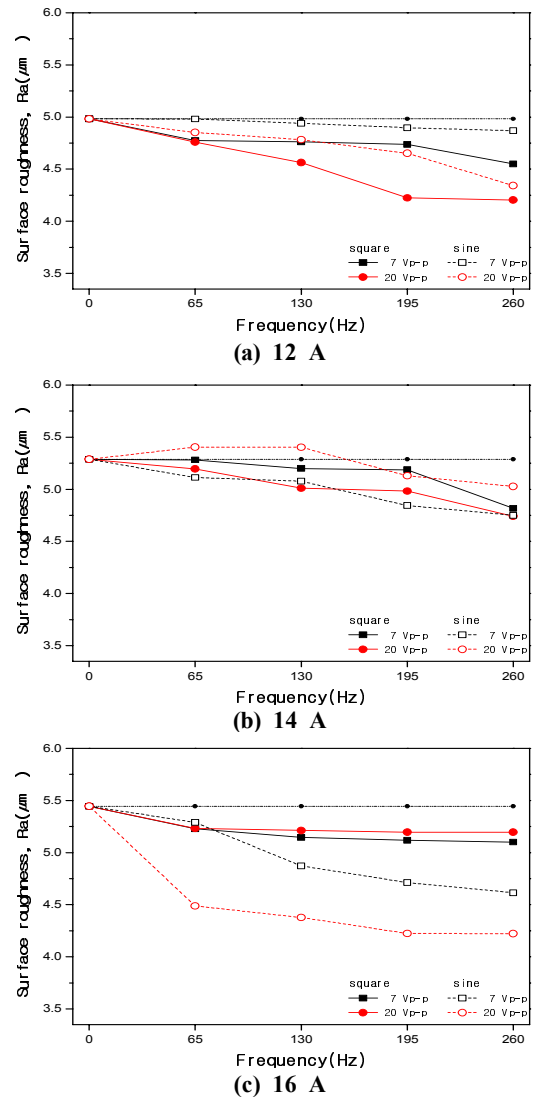


Fig. 6 Surface roughness according to frequency of 2-dimensional vibration

거칠기를 보여주고 있다.

Fig. 6은 2차원으로 가공속도 2 mm/min, 진폭 및 진동수의 변화에 따른 시험편의 표면 거칠기의 변화를 나타내고 있다.

Fig. 6 (a)의 구형파 및 사인파 모두 낮은 진폭(7 V_{p-p})에서 진동수에 관계없이 거의 변화가 없음을 보여주고 반면 구형파 및 사인파 모두 높은 진폭(20 V_{p-p})에서 진동수가 0 Hz에서 260 Hz로 증가할

수록 표면 거칠기 값이 감소하는 것을 보여준다. 특히 구형파는 높은 진폭(20 V_{p-p})에서 낮은 표면 거칠기를 보여주고 있다.

Fig. 6 (b)의 구형파는 진동수에 관계없이 거의 변화가 없음을 보여주고 반면 사인파는 진동수가 0 ~ 130 Hz구간에서는 표면 거칠기 값이 증가하고 130 ~ 260 Hz구간에서는 표면 거칠기 값이 감소하는 것을 보여준다. 특히 구형파는 높은 진폭(20 V_{p-p})에서 낮은 표면 거칠기를 보여주는 반면 사인파는 낮은 진폭(7 V_{p-p})에서 낮은 표면 거칠기를 보여주고 있다.

Fig. 6 (c)의 구형파는 진동수에 관계없이 거의 변화가 없음을 보여주고 반면 사인파 진동수가 구형파 진동수보다 표면 거칠기 값이 감소하는 것을 보여준다. 특히 구형파는 낮은 진폭(7 V_{p-p})에서 낮은 표면 거칠기를 보여주는 반면 사인파는 높은 진폭(20 V_{p-p})에서 낮은 표면 거칠기를 보여주고 있다.

Fig. 6에서 전류가 12 A, 16 A에서는 표면 거칠기 값이 감소하는 것을 보여준다. 특히 진동수가 65 Hz에서 260 Hz로 증가할수록 동일한 표면 거칠기를 보여주고 있으며, 사인파가 구형파보다 낮은 표면 거칠기를 보여주고 있다.

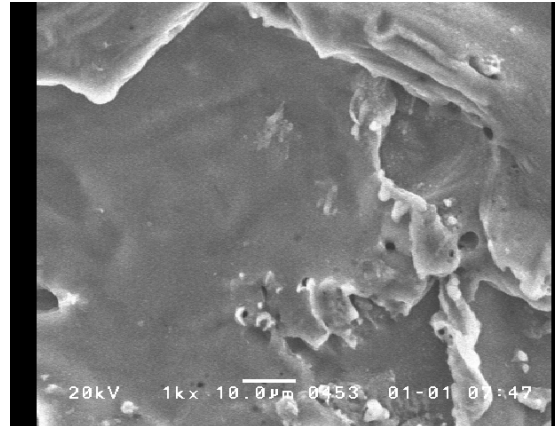
4.2 표면형상 특성

Fig. 7은 가공표면의 형상을 더 세밀하게 고찰하기 위해 주사전자현미경(SE.M.)의 배율을 1000배로 하여 촬영한 시험편의 가공표면을 보여주고 있다.

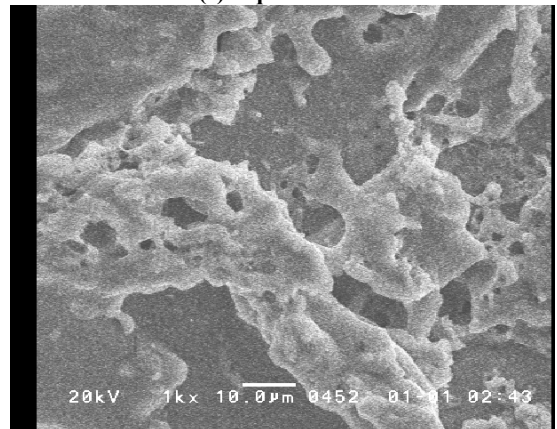
Fig. 7 (a)와 비교하여 Fig. 7 (b)는 절삭 후 알루미늄 표면 내부에 많은 기공이 발생하여 표면이 불안정한 모습을 보여주고 있다.

Fig. 7 (a)구형파에서 단위 면적에 나타나는 봉우리의 수 감소, (b)사인파에서 봉우리의 수십 개소로 구형파에서 봉우리의 개소가 보다 많게 나타나고 있다. 또한 사인파는 불규칙한 요철이 많이 나타나 전체적으로 일정하게 와이어가 진행하지 않은 반면 구형파는 가공표면이 비슷하게 나타났으며, 가공면의 거칠기는 약간 거칠지만 전체면으로 일정하게 와이어 가공이 진행됨을 알 수 있었다.

5. 결론



(a) Square wave



(b) Sine wave

Fig. 7 FE-SEM Photograph of WED-machined surface (x1,000)

본 연구에서는 하이브리드 와이어 컷 방전가공에서 알루미늄 합금 6061 가공면에 2차원 진동(진동수)을 동시에 적용하여 표면 거칠기에 미치는 영향을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 와이어 방전 중 발생하는 진동(고유진동수)을 알아내고 그 진동을 부가한 하이브리드 방전가공의 표면 거칠기가 향상됨을 확인하였다.
2. 고유진동수(130 Hz)보다 높은 진동수로 가공했을 때가 더 개선된 표면 거칠기 값을 나타냄을 확인하였다.
3. 낮은 진폭(7 V_{p-p})과 높은 진폭(20 V_{p-p})에서 높은 진폭(20 V_{p-p})일 때 와이어의 감쇠진동으로 여겨

지는 현상 발생이 낮은 진폭보다 약 10%의 표면 거칠기가 더 개선되었다.

4. 낮은 전류(12 A)와 높은 전류(16 A)에서 높은 전류(16 A)일 때 동일한 표면 거칠기 값을 나타냄을 확인하였다.
5. 가공면에 부가한 구형파보다는 사인파의 표면 거칠기가 향상됨을 확인하였다.
6. 일반적인 방전가공보다 하이브리드(와이어 진동 부가)의 가공방법의 표면 거칠기 값이 약 20% 감소되는 경향이 나타났다.

Electric Discharge Cutting Conditions of the Aircraft Structural Al alloy 2024”, Proceeding of KSMTE Autumn Conference 2010, pp. 420-425, 2010.

8. Ryu, C. W. and Choi, S. D., “Characteristics of Surface Roughness Based on Wire Vibration and Wire-cut Electric Discharge Machining of Aluminum Alloy 6061 (I)”, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 14, No. 2, pp. 59-66, 2015.

REFERENCES

1. El-Hofy, H., Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes, McGraw-Hill, pp. 115-139, 2005.
2. Kim, M. Y. Byiringiro, J. B. Park, J. K. and Ko, T. J., “A Study of EDM and Milling Hybrid Machining”, Proceeding of KSMTE 2010 Spring Conference, pp. 24, 2010.
3. Pramila, A., “Natural Frequencies of a Submerged Axially Moving Band”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 113, No. 1, pp. 198-203, 1987.
4. Wickert, J. A. and Mote, C. D., “Classical Vibration Analysis of Axially Moving Continua”, Journal of Applied Mechanics, Vol. 57, No. 3, pp. 738-744, 1990.
5. Lee, S. Y. Mote Jr. C. D., “Traveling Wave Dynamic In a Translating String Coupled To Stationary Constraints: Energy Transfer And Mode Localization”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 212, No. 1, pp. 1-22, 1998.
6. Chae, H. J. and Lee, S. Y., “Vibration Characteristics and Tension Control of a Wire in WEDM”, J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 18, No. 11, pp. 86-92, 2001.
7. Ryu, C. W. Choi, S. D. and Lee, S. K., “Effects of Surface Roughness in the Wire-cut